



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS DE SONDAS  
AUTÓNOMAS CON GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA  
PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

Laura Iracheta Rodríguez

Antonio Rodríguez García

Pamplona, 24 de Abril de 2013





## Índice

<b>1. Estado del arte</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>3. Introducción a la termoelectricidad</b>	<b>7</b>
3.1. Historia de la termoelectricidad . . . . .	7
3.2. Efectos termoeléctricos . . . . .	8
3.3. Relaciones Kelvin . . . . .	10
3.4. Funcionamiento de un elemento termoeléctrico como generador de energía eléctrica . . . . .	11
3.4.1. Definición y estructura de un elemento termoeléctrico . . . . .	11
3.4.2. Expresiones que gobiernan el funcionamiento de un par termoeléctrico . . . . .	15
3.4.3. Expresiones que gobiernan el funcionamiento de un módulo termoeléctrico . . . . .	18
3.4.4. Modificación de las ecuaciones teniendo en cuenta las características de un módulo común . . . . .	21
<b>4. Estructura del banco de ensayos de pruebas</b>	<b>25</b>
4.1. Estructura del generador termoeléctrico . . . . .	25
4.1.1. Placas de aluminio con resistencias en su interior . . . . .	25
4.1.2. Módulos Peltier . . . . .	27
4.1.3. Disipador . . . . .	27
4.2. Electrónica . . . . .	31

4.3. Aparato de medida . . . . .	33
4.4. Adquisidor de datos . . . . .	34
4.5. Cámara climática . . . . .	35
4.6. Son das . . . . .	35
<b>5. Estudio de las posibles configuraciones del generador termoeléctrico</b>	<b>37</b>
5.1. Configuración I: Generador termoeléctrico en la pared exterior de la chimenea . . . . .	37
5.2. Configuración II: Generador termoeléctrico en la pared interior de la chimenea . . . . .	40
<b>6. Estudio experimental de las curvas de funcionamiento V-I,P-I,P-R</b>	<b>43</b>
6.1. Configuración I y condiciones climatológicas de verano . . . . .	43
6.2. Configuración I y condiciones climatológicas de invierno . . . . .	54
<b>7. Estudio del punto óptimo para cada disipador analizado y en cada configuración estudiada</b>	<b>63</b>
7.1. Configuración I y condiciones climatológicas de verano . . . . .	63
7.2. Configuración I y condiciones climatológicas de invierno . . . . .	66
<b>8. Cálculo de la potencia consumida por la sonda y el aparato de medida</b>	<b>69</b>
8.1. Estudio de la potencia consumida por el aparato de medida . . . . .	69
8.2. Estudio de la potencia consumida a través de una transmisión de datos vía bluetooth . . . . .	70
<b>9. Diseño definitivo de un dispositivo funcional de generación termoeléctrica</b>	<b>73</b>

10. Estudio de la viabilidad económica del modelo desarrollado	83
11. Conclusiones	89
Nomenclatura	91
Bibliografía	93
Anexos	95
A. Cálculo de las temperaturas en la chimenea de la central térmica de Sangüesa	95
B. Resultados obtenidos para la obtención de las curvas V-I, P-I de los ensayos realizados	111



## 1. Estado del arte

Las llamadas *Energías Renovables* ya se comenzaron a utilizar desde hace muchos siglos antes, y su empleo continuó durante toda la historia hasta la llegada de la Revolución Industrial, en la que, debido al bajo coste del petróleo, fueron abandonadas.

En los últimos años la subida del precio de los combustibles convencionales ha sido notoria, pero también ha servido para recordarnos la importancia que tiene la energía en nuestra sociedad. Gracias a ello, se han activado procesos de búsqueda de nuevas alternativas.

En los años 1970-1973 se produce el punto de inflexión. Es aquí cuando el precio del petróleo se duplica y se hace visible para la sociedad la llamada crisis de energía, cuyas causas son principalmente:

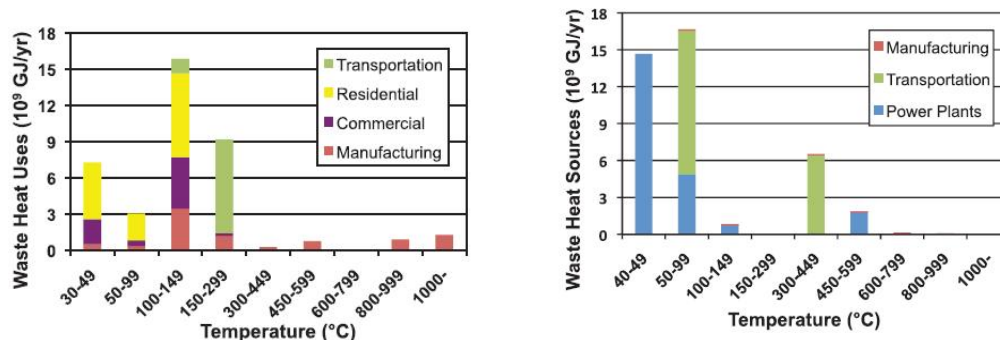
- El deseo de los países productores de tener en sus manos la extracción y distribución del petróleo.
- El cambio experimentado en los mercados de petróleo, a consecuencia de las mayores importaciones de EEUU y Japón.
- La rigidez a corto plazo de la demanda debido a la alta elasticidad-renta y la baja elasticidad-precio.

Así pues, a partir de este momento las energías renovables cobran gran importancia en nuestra sociedad, potenciándose el uso de la energía eólica, solar térmica y solar fotovoltaica, reduciendo considerablemente el consumo de combustibles fósiles.

Aunque el foco principal de producción de las Energías Renovables es la alta potencia, también existe una línea de desarrollo a baja potencia. Aquellos aparatos eléctricos y electrónicos que no se conectan a la red eléctrica necesitan baterías para poder funcionar, cuya vida útil es limitada y utilizan productos químicos perjudiciales para el medio ambiente. La aplicación de la tecnología termoeléctrica a estos dispositivos está ganando importancia, y ya hoy en día se está comenzando a sustituir dichas baterías por generadores termoeléctricos pequeños, baratos y eficientes.

La *generación termoeléctrica* ha captado la atención de los investigadores debido a su capacidad de producir energía eléctrica a partir de *calor residual*, tanto de procesos industriales como domésticos.

Como ejemplo, podemos citar un estudio realizado en Estados Unidos sobre la energía cosechada y su reuso con el objetivo de reducir el altísimo gasto de energía primaria [1]. Dicho artículo proporciona los datos de consumo energético. En Estados Unidos, el 97 % de la energía primaria proviene de la energía térmica obtenida a partir de fuentes nucleares y químicas. Además, el 43,9 % del consumo de energía se transforma en electricidad. El 93,4 % de este porcentaje, se convierte a electricidad mediante procesos térmicos, liberándose una notable cantidad de calor residual. Otros procesos manufactureros y la combustión de los vehículos también liberan cantidades significantes de calor residual.



(a) Posibles aplicaciones del calor residual por rango de temperaturas (b) Fuentes de calor residual por rango de temperaturas

**Figura 1:** Aplicaciones y fuentes de calor residual en USA

Otro estudio que se puede destacar es el realizado en el sector alimenticio del Reino Unido [2]. Se estima que existe un calor residual, que puede ser recuperado, de 11,4 TWh, que es el 5 % del consumo total de energía. En el sector alimenticio y de bebidas existe un calor desperdiciado de 2.8 TWh.

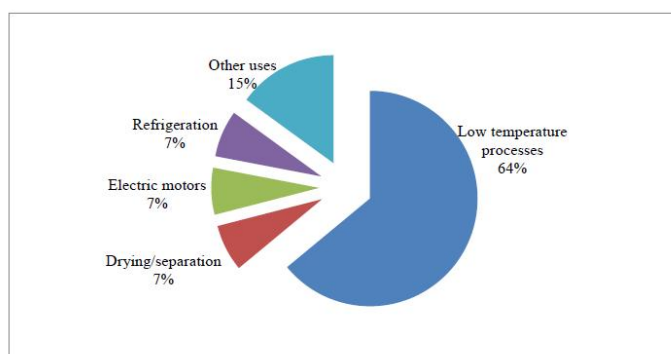
En la tabla 1 se muestra que una enorme cantidad de emisión de gases puede ser reducida con la completa recuperación del calor desperdiciado. Podemos reducir 285 millones de libras en costes así como 2 millones de toneladas en gases emitidos reemplazando el calor actualmente utilizado por el calor residual. En particular, el sector alimenticio y de bebidas puede reducir en costes 70 millones de libras y alrededor de 500.000 toneladas de  $CO_2$ .

El sector alimenticio utiliza el 25 % del consumo total de energía del Reino Unido, es decir, 42 TWh. El 64 % de esta energía, como se muestra en la figura 2 es utilizada en procesos a baja temperatura, por lo que la mayoría del calor residual disponible estará en un rango de bajas temperaturas. Además, procesos como refrigeración y secado

también pueden ser incluidos en la categoría de baja potencia.

	Units of waste energy (kWh)	Cost per unit gas [5] (£/kWh)	Greenhouse gas emissions per unit of gas [6] (kg/kWh)	Potential Cost savings (£m)	Potential Emissions savings (Tonne CO <sub>2</sub> eq)
<b>Industry total</b>	11.4 x 10 <sup>9</sup>	0.025	0.1836	£285m	2093040
<b>Food &amp; drinks sector</b>	2.8 x 10 <sup>9</sup>	0.025	0.1836	£70m	514080

**Cuadro 1:** Ahorro de costes y emisiones por año debido a la recuperación de calor residual en Reino Unido



**Figura 2:** Desglose del uso de la energía en el sector alimenticio del Reino Unido

Por otra parte, debemos mencionar una aplicación similar a la que se pretende realizar en este proyecto. Se trata de la construcción de un generador termoeléctrico para la alimentación de sondas autónomas para monitorizar la temperatura de los residuos nucleares[3].

Como ya sabemos, el combustible nuclear debe ser almacenado con una alta seguridad. Este proceso tiene tres fases. En la primera fase, el combustible nuclear es introducido en piscinas de agua, donde pierde la mayor parte de la radioactividad cediéndosela al agua. La segunda se trata de un sistema de almacenamiento por refrigeración de aire seco que dura unos 5 años. Finalmente, los residuos nucleares se almacenan en barriles en seco. Estos barriles constan de dos componentes: el contenedor de almacenamiento en seco (DSC) y el el módulo de almacenamiento horizontal (HSM). El DSC está dentro del HSM. Gracias a la caída de temperatura que sufren los residuos nucleares, un generador termoeléctrico como fuente de alimentación es idóneo para monotorizar la temperatura de los residuos.

Así pues, el emplazamiento ideal para el TEG será la zona entre la superficie del DSC y la pared del HSM. Realizando un análisis térmico a través del programa EES, modularon las temperaturas y obtuvieron un salto de temperaturas entre las paredes de los módulos peltier de 5.4 °C. Con ese salto de temperaturas el TEG genera 0.01 W, suficiente para conectarlo a un convertidor DC/DC que amplifica la señal para alimentar el sistema de medida.

En este contexto, se enmarca el presente proyecto investigador, en el cual se plantea el diseño y desarrollo de prototipos de sondas autónomas alimentadas con generadores termoeléctricos para aplicaciones industriales. El caso concreto que se va a estudiar es la instalación de una sonda autónoma en la chimenea de humos de la central de biomasa situada en la localidad navarra de Sangüesa.



## 2. Objetivos

Este proyecto fin de carrera está dirigido para su posible aplicación en la central de biomasa que el grupo ACCIONA ENERGÍA posee en la localidad de Sangüesa. Los objetivos que se pretenden llegar en este proyecto son:

- Búsqueda bibliográfica de los últimos desarrollos de dispositivos de generación termoeléctrica existentes en la actualidad.
- Estudio del tipo de sondas y su posible localización para el control de diversos parámetros en el interior de la chimenea de humos de la central de biomasa.
- Diseño y desarrollo de los prototipos de generación termoeléctrica para alimentar sondas autónomas.
- Optimización experimental para desarrollar un prototipo definido.
- Estudio de la viabilidad económica del modelo desarrollado.



### 3. Introducción a la termoelectricidad

#### 3.1. HISTORIA DE LA TERMOELECTRICIDAD

La Termoelectricidad es la rama de la Termodinámica donde se estudian los fenómenos en los que están presentes el calor y la electricidad. Nace en el siglo XIX con el descubrimiento de los efectos Seebeck, Peltier y Thomson.

Se conoce como padre de la termoelectricidad a **Thomas Johann Seebeck** nacido en Tallin, Estonia, el 9 de abril de 1770. Se graduó como médico en 1802. A pesar de ello, su interés en los fenómenos físicos le empujaron a abandonar la práctica de la medicina. En 1820 empezó a investigar experimentalmente las relaciones entre la electricidad y el calor. En 1821 formó un circuito cerrado uniendo dos alambres de materiales diferentes, cobre y bismuto. [4]

Accidentalmente descubrió que si calentaba una de las uniones manteniendo la otra a temperatura ambiente, aparecía un campo magnético en las inmediaciones de los alambres, lo que se ponía de manifiesto en la desviación que se producía en la aguja de una brújula.

Siempre se ha mantenido que fue Seebeck el descubridor del efecto termoeléctrico, aunque al revisar los estudios de **Alessandro Volta** se ha constatado que en sus primeros trabajos pioneros sobre electricidad midió diferencias de potencial debidas a la termoelectricidad al usar contactos entre diversos metales. Sin embargo, no prestó especial atención a este fenómeno en particular.

Además, las deducciones incorrectas de este descubrimiento por parte de Seebeck fueron "el gradiente de temperaturas provoca la magnetización de los metales" y "el campo magnético terrestre es producido por la diferencia de temperaturas existente entre el ecuador y los polos". Jamás llegó a creer que el campo magnético era una consecuencia directa de la aparición de una corriente eléctrica, en gran parte debido a su enemistad con su contemporáneo **Oersted**, que descubrió en 1812 la interacción existente entre una aguja imantada y un circuito eléctrico simple.

Otro investigador que merece una reseña histórica es **William Thomson Kelvin** (1823-1907). Fue un matemático y físico británico, y uno de los más importantes profesores de su época. Nació en Belfast, Reino Unido, el 26 de junio de 1823 y estudió en las universidades de Glasgow y Cambridge. En el campo de la termodinámica, Kelvin desarrolló el trabajo realizado por James Prescott Joule sobre la interrelación del calor y la energía mecánica, y en 1852 ambos colaboraron para investigar el fenómeno que

posteriormente se conoció como efecto Joule-Thomson. En termoelectricidad, dedujo las llamadas *Relaciones Kelvin*, que permiten interpretar conjuntamente los coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson.

En el siglo pasado también se estudiaron los efectos termoelectricos. El enfriamiento termoelectrico no llegó a ser factible hasta los estudios de **Telkes** en los años 30, y de **Ioffe** en 1956, que dieron lugar a la llamada figura de mérito. Con esta investigación se llegó a la conclusión de que los materiales termoelectricos idóneos eran los semiconductores, especialmente los muy densamente dopados.

En la actualidad, la termoelectricidad ha avanzado enormemente. En los Estados Unidos, el centro *NIST* (National Institute of Standards and Technology) en la localidad de Maryland, Virginia, ha desarrollado un tipo de semiconductores *n-p*, partiendo de polvos químicos. Los resultados han sido muy satisfactorios. Además, la empresa *ASARCO*, emplazada en Nueva York, está constantemente trabajando en la obtención de nuevos y mejores metales semiconductores para aplicaciones termoelectricas. También se debe mencionar el último logro científico en el ámbito de la generación termoelectrica, conseguido por investigadores estadounidenses, al desarrollar un nuevo material semiconductor que bate el récord en convertir calor residual en electricidad [5]. El compuesto es un derivado dopado del binomio plomo-teluro, usado por primera vez por la NASA en el Apolo. En España, se creó por primera vez la Asociación de Termoelectricidad (*A.I.T*) en la ciudad de Pamplona en el año 1911.

Así pues, parece que el interés por la termoelectricidad está ganando peso en nuestra sociedad y tanto investigadores como empresas emprendedoras han decidido prestar atención a este tipo de generación de energía. Todo ello nos conduce a pensar, que el futuro será prometedor.

### 3.2. EFECTOS TERMOELÉCTRICOS

A continuación se describen las ecuaciones que gobiernan los fenómenos termoelectricos Joule, Seebeck, Peltier y Thomson. Junto a ellos aparecen los efectos Hall, Nernst, Ettingshausen y Righi-Leduc, de influencia no significativa a nivel macroscópico [6], por lo que no se consideran.

#### ■ Efecto Joule

La más conocida interacción entre un fenómeno eléctrico, la conducción de corriente eléctrica, y su fenómeno térmico asociado, el calentamiento del conductor por el que circula la corriente, es el Efecto Joule. La materia ofrece cierta "resistencia" al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al

entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor, según indica la expresión 1.[7]

$$Q_{Joule} = R_0 I^2 \quad (1)$$

### ■ Efecto Seebeck

Dado un circuito formado por dos materiales distintos homogéneos, “A” y “B”, unidos por sus extremos, si estas uniones se mantienen a distinta temperatura,  $T$  y  $T+dT$ , aparece una fuerza electromotriz ( $E_t$ ) si el circuito está abierto, o bine una corriente eléctrica  $J$ , que dependen del coeficiente Seebeck de cada uno de los materiales y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones.

La relación entre la fuerza electromotriz,  $E_{AB}$ , y la diferencia de temperaturas entre las uniones,  $dT$ , define el coeficiente Seebeck,  $\alpha_{AB}$  como

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2)$$

$\alpha_A(T)$  y  $\alpha_B(T)$  son respectivamente las potencias termoelectricas absolutas de A y B y son características de cada metal. En general,  $\alpha_{AB}$  no es constante, sino que depende de la temperatura  $T$ . [8]

### ■ Efecto Peltier

Consiste en el enfriamiento o calentamiento de la unión de dos materiales al paso de una corriente eléctrica. Este enfriamiento o calentamiento depende del coeficiente Seebeck de cada material, de la intensidad de corriente y de la temperatura de la unión. La potencia calorífica intercambiada en la unión entre A y B es:

$$\dot{Q}_P = \pm \pi_{AB} J = \pm J T (\alpha_B - \alpha_A) \quad (3)$$

donde  $\pi_{AB}$  es el llamado coeficiente Peltier, que se define como el calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula a través de la misma [7]:

$$\pi_{AB} = \frac{\dot{Q}_P}{\int_S J dS} = T (\alpha_B - \alpha_A) \quad (4)$$

- J: Flujo de corriente eléctrica
- S: Superficie
- T: Temperatura

- $\alpha_A, \alpha_B$ : Coeficiente Seebeck de los materiales A y B respectivamente

#### ■ Efecto Thomson

El efecto Thomson consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo, con una distribución de temperaturas no homogénea, por el que circula una corriente.

El flujo neto de potencia calorífica por unidad de volumen, en un conductor de resistividad  $\rho$ , con un gradiente longitudinal de temperatura, por el que circula una densidad de corriente  $J$  será:

$$\dot{q} = \frac{J^2}{\rho} + \sigma \nabla T J \quad (5)$$

donde  $\sigma$  es el coeficiente Thomson. El primer término corresponde al efecto Joule, irreversible, mientras que el segundo expresa el efecto Thomson, reversible. Desarrollando esta expresión para obtener la relación entre el coeficiente Thomson y Seebeck y teniendo en cuenta las ecuaciones que rigen los efectos Peltier y Seebeck, se llega a

$$\sigma \equiv \frac{\dot{q}_\sigma}{\nabla T J} = T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (6)$$

Quedando para la unión

$$\sigma_A - \sigma_B = T \frac{\partial \alpha_A}{\partial T} - T \frac{\partial \alpha_B}{\partial T} = T \frac{\partial}{\partial T} (\alpha_A - \alpha_B) \quad (7)$$

### 3.3. RELACIONES KELVIN

El científico William Thomson Kelvin desarrolló las llamadas *Relaciones Kelvin* que permiten interpretar conjuntamente los coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson.

En un circuito termoeléctrico, los procesos reversibles, es decir, los efectos Peltier y Thomson, ocurren simultáneamente al calentamiento de Joule y a la conducción térmica que son procesos irreversibles. El coeficiente Thomson, así como el Seebeck son una propiedad del conductor, mientras el Peltier es una propiedad de los dos metales.

En el caso de un par termoeléctrico con diferentes temperaturas en las soldaduras y por el que circula una corriente, habrá una conducción calorífica desde la soldadura caliente a la fría, un efecto Joule en cada conductor, un efecto Thomson en cada conductor y un efecto Peltier en cada soldadura. Lord Kelvin dedujo aplicando el

primer principio de la termodinámica y el segundo principio para procesos reversibles, las relaciones de interacción termoelectrica que llevan su nombre:

- Primera relación de Kelvin:

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{\partial^2 E_{AB}}{\partial T^2} \quad (8)$$

- Segunda relación de Kelvin:

$$\pi_{AB} = T \frac{\partial E_{AB}}{\partial T} \quad (9)$$

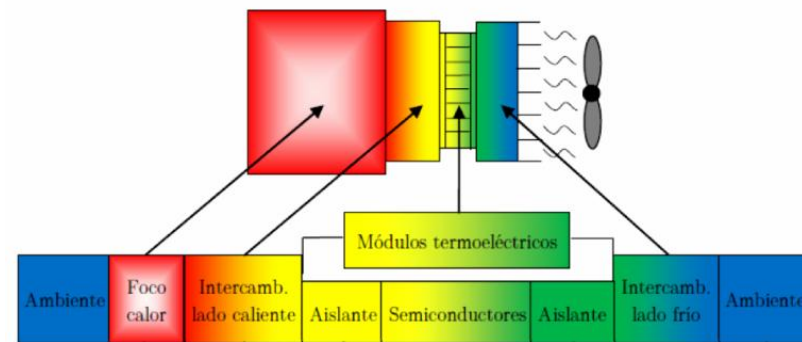
### 3.4. FUNCIONAMIENTO DE UN ELEMENTO TERMOELÉCTRICO COMO GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA

#### 3.4.1. Definición y estructura de un elemento termoelectrico

Un dispositivo termoelectrico es capaz de transformar directamente la electricidad en calor, o realizar el proceso contrario. La transformación de electricidad en calor, tanto para calefacción como para refrigeración, se denomina **refrigeración termoelectrica**, mientras que la transformación de calor en electricidad se conoce como **generación termoelectrica**. Los dispositivos pertenecientes a ambas líneas se asemejan a las máquinas térmicas utilizadas normalmente para producir frío, calor o para generar energía eléctrica (equipos de aire acondicionado, refrigeradores, bombas de calor o motores), con la diferencia de que, en este caso, la corriente de electrones actúa de fluido de trabajo. Esta característica, sumada al hecho de que estos dispositivos no presentan partes móviles, los convierte en equipos robustos, compactos y silenciosos.

En el presente proyecto nos centraremos en la generación termoelectrica, es decir, en la conversión de calor, exactamente, calor residual, en electricidad. Para ello comenzamos definiendo calor residual. Un calor se denomina *de desecho o residual* si se ha obtenido como subproducto de algún proceso y no es aprovechado con posterioridad, sino que es disipado en el ambiente. Este es el caso de los humos de la chimenea de la central térmica de Sangüesa, para el cual el presente proyecto preve su posible aplicación.

Tal y como muestra la Figura 3, un generador termoelectrico se compone de uno o varios módulos conectados entre sí, que transforman en energía eléctrica parte del calor que reciben desde un foco caliente, y emiten el resto hacia un foco frío, normalmente el ambiente. El teorema de Carnot aplicado a este dispositivo concluye que el rendimiento del sistema aumenta conforme las temperaturas de las caras caliente y fría de los



**Figura 3:** Esquema básico de un generador termoelectrico

módulos termoelectricos se aproximan a las temperaturas de los focos caliente y frío respectivamente. De ahí surge la necesidad de introducir intercambiadores de calor entre estos módulos y cada uno de los focos térmicos.

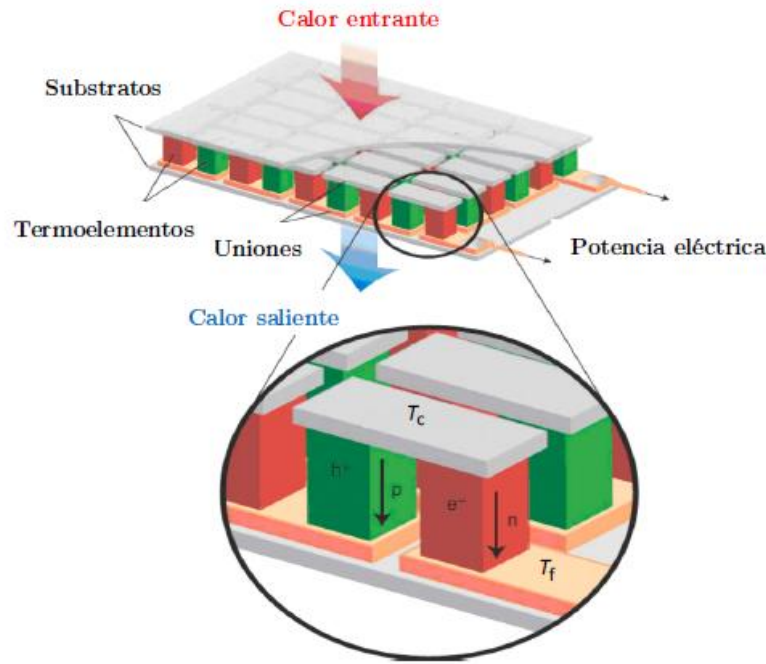
El elemento más importante del generador es el módulo termoelectrico (Figura 4), ya que es en él donde se produce la transformación del calor en electricidad. La base de este fenómeno es el efecto Seebeck, ya descrito en la sección 3.2, que proporciona la relación entre el gradiente de temperatura aplicado a un módulo y la fuerza electromotriz generada por él.

Un módulo convencional se compone de varios pares termoelectricos, conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Cada par se compone, a su vez, de dos termoelementos semiconductores, uno de tipo n, donde predominan los electrones libres, y otro de tipo p, donde predominan los huecos libres, conectados físicamente mediante uniones metálicas, casi siempre de cobre. Dos substratos rígidos de material cerámico proporcionan firmeza mecánica al conjunto y aíslan eléctricamente el circuito interior.

Para la mejor comprensión de un módulo termoelectrico , vamos a explicar el funcionamiento de un par termoelectrico. El circuito mostrado en la Figura 5 expone el ejemplo más sencillo. Muestra un único semiconductor de tipo n, conectado a un voltímetro. A medida que el calor se mueve del foco caliente al foco frío, los elementos de carga, es decir, los electrones del termoelemento tipo n, son portados por el calor. Además, el calor también afecta al movimiento de portadores de carga en la vía de retorno.[9]

En la generación termoelectrica, también se emplean termoelementos tipos p. La Figura 6 muestra una configuración básica. Nótese cómo el flujo de electrones va en





**Figura 4:** Esquema de un módulo y par termoelectrico

dirección opuesta a la del flujo de huecos.

Con la utilización de ambos materiales en un dispositivo de generación termoelectrica es como realmente se puede optimizar el efecto Seebeck. Las corrientes eléctricas generadas por cada termoelemento no se oponen una a otra, y al estar conectados eléctricamente en serie, provoca el aumento del efecto Seebeck, con un consecuente aumento de la energía eléctrica generada. Esta es la principal razón por la que se utilizan en módulos termoelectricos semiconductores de tipo n y p.

Ya se utilice para la generación de electricidad o para la refrigeración termoelectrica, las características necesarias que deben presentar los semiconductores son un coeficiente de Seebeck  $\alpha$  alto, una resistividad eléctrica  $\rho$  baja y una conductividad térmica  $\kappa$  también lo más baja posible. Los estudios de Telkes en los años 30, y de Ioffe en 1956, dieron lugar a la llamada figura de mérito  $Z$ . Es un indicador de la eficiencia de un material termoelectrico. Dicha figura de mérito se define como:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\sqrt{\kappa_p \rho_p} \sqrt{\kappa_n \rho_n}} \quad (10)$$

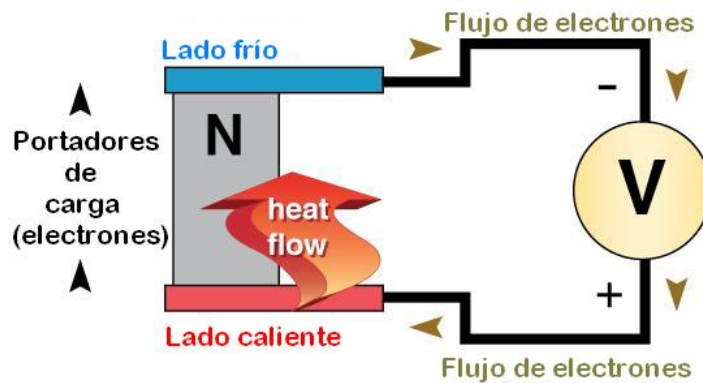


Figura 5: Esquema de un termoelemento tipo n

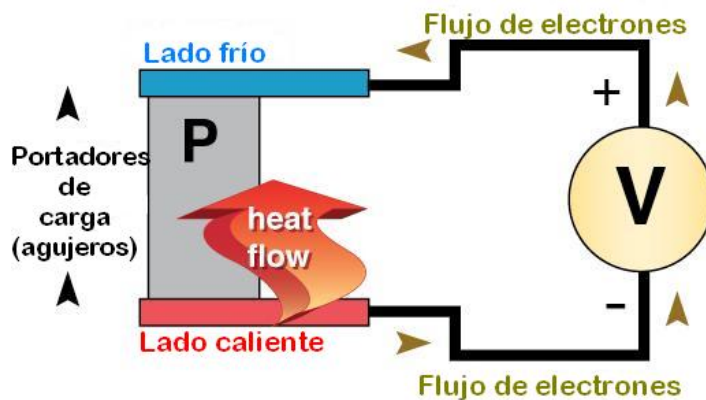
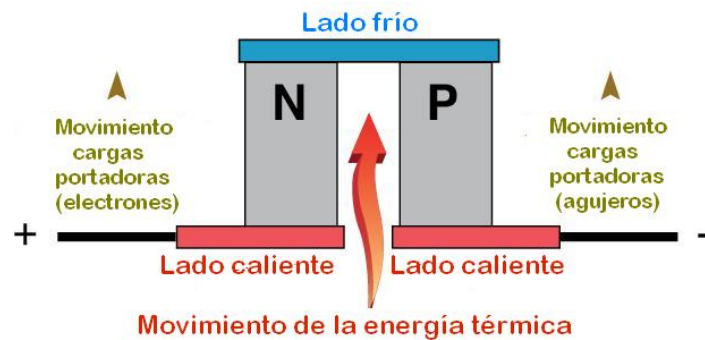


Figura 6: Esquema de un termoelemento tipo p

Los materiales con un valor elevado de la figura de mérito son precisamente los semiconductores, en especial los muy densamente dopados. Los más conocidos son los telururos de antimonio y bismuto. Para el caso tratado en éste proyecto, la generación termoeléctrica, el rango de temperaturas de trabajo no es superior a  $100^{\circ}\text{C}$ , y por lo tanto el material más empleado en este tipo de aplicaciones es el  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (aleación de bismuto y telurio). La principal ventaja que ofrece este semiconductor respecto a otros es su baja conductividad térmica la cual permite obtener buenos rendimientos cuando se trabaja a temperaturas cercanas a la del ambiente.



**Figura 7:** Esquema de un par termoelectrico

### 3.4.2. Expresiones que gobiernan el funcionamiento de un par termoelectrico

Como ya hemos mencionado anteriormente, un elemento termoelectrico está compuesto de dos materiales semiconductores, uno del tipo n y otro del p, unidos en uno de sus extremos mediante una unión metálica o soldadura.

Se introducen a continuación el conjunto de expresiones que rigen el comportamiento de un par termoelectrico, y posteriormente, se generalizan para el caso de un módulo termoelectrico completo. Como inicio, vamos a describir las hipótesis simplificativas adoptadas en este modelo:

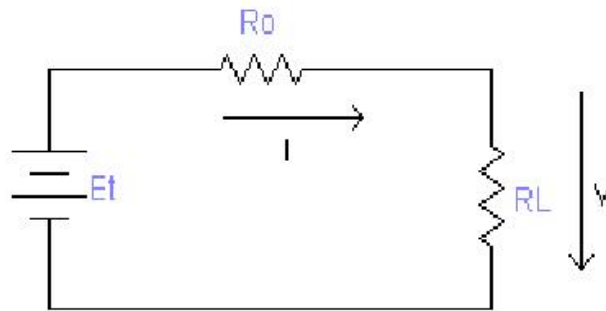
- Todos los materiales que forman parte del par termoelectrico son homogéneos.
- El aislamiento del circuito eléctrico es perfecto y la corriente eléctrica es unidimensional.
- El flujo de calor también es unidimensional. Suponemos que el par está aislado térmicamente excepto en la unión metálica, donde hay entradas y salidas de flujos de calor.
- Las variables siguientes dependen de la temperatura:
  - $\alpha$  = Coeficiente Seebeck
  - $\kappa$  = Conductividad térmica
  - $\rho$  = Resistividad eléctrica
  - $\sigma$  = Coeficiente Thomson

- Los subíndices  $p$ ,  $n$  se refieren al semiconductor p y al semiconductor n respectivamente.
- Los subíndices  $h$ ,  $c$  se refieren al extremo caliente (h, hot) y al extremo frío (c, cold) de cada semiconductor.

Si esta unión se mantiene a una temperatura caliente  $T_h$  mientras que los otros extremos de los semiconductores se mantienen a una temperatura más fría  $T_c$ , se produce una pequeña fuerza electromotriz  $E_t$  de valor [10]:

$$E_t = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) * T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) * T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c) \quad (11)$$

Si se cierra el circuito mediante una resistencia de carga  $R_L$ , aplicando la teoría básica de circuitos, se puede dibujar una analogía eléctrica de la siguiente forma:



**Figura 8:** Analogía eléctrica

$R_L$  = Resistencia de carga

$V$  = Diferencia de potencial en la resistencia de carga  $R_L$

$I$  = Corriente eléctrica que circula por el circuito

$R_0$  = Resistencia eléctrica propia del elemento termoelectrico

$R_0$  está formada por la resistencia eléctrica en el semiconductor n, la resistencia eléctrica en el semiconductor p y la resistencia eléctrica de los cuatro contactos

semiconductor-material de unión,[11]. Las dos primeras son fáciles de deducir; la última es más compleja porque no se refiere a la resistencia eléctrica del material de unión sino a la que se opone al paso de la corriente desde un material semiconductor a un material conductor:

$$R_0 = R_P + R_n + R_{uniones} = \rho \frac{L_p}{A_p} + \rho \frac{L_n}{A_n} + 2 \frac{\rho_{superficialunión,p}}{A_p} + 2 \frac{\rho_{superficialunión,n}}{A_n} \quad (12)$$

$L$ = Longitud de cada semiconductor.

$A$  = Área transversal de cada semiconductor.

$\rho_{superficialunión}$ = Resistividad eléctrica superficial semiconductor-conductor.

Aplicando la teoría básica de circuitos se puede deducir el valor de la diferencia de potencial  $V$ , la intensidad de corriente  $I$  y la potencia consumida por la resistencia de carga  $P$ :

Sea el factor adimensional  $m = \frac{R_L}{R_0}$

$$V = E_t \frac{R_L}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) * T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) * T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{m}{m+1} \quad (13)$$

$$I = E_t \frac{1}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) * T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) * T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (14)$$

$$P = E_t^2 \frac{R_L}{(R_L + R_0)^2} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) * T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) * T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (15)$$

Aplicando el primer principio de la termodinámica al conjunto, se obtiene que:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + P \quad (16)$$

De forma parecida, debido al efecto Peltier, al pasar la corriente generada por el circuito, se produce una absorción de calor en la unión que está a temperatura más alta, de valor:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) T_h I \quad (17)$$

En la otra unión se produce una cesión de calor de valor:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) T_c I \quad (18)$$

También se han de tener en cuenta las pérdidas de calor por efecto Joule, y cuyo valor es:

$$\dot{Q}_{Joule} = I^2 R_0 \quad (19)$$

Está compuesto por las pérdidas de calor por efecto Joule en los semiconductores:

$$\dot{Q}_J = I^2(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n}) \quad (20)$$

Y las pérdidas de calor por efecto Joule en las uniones de la cara caliente y de la cara fría respectivamente:

$$\dot{Q}_{Contacto,h} = I^2(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n}) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{Contacto,c} = I^2(\frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n}) \quad (22)$$

Debido al efecto Thomson, aparece una generación o absorción de calor en los semiconductores. El semiconductor p, el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen sentidos contrarios; por eso, si el coeficiente Thomson  $\sigma_p$  es positivo, en el semiconductor p se absorbe un flujo de calor [8]:

$$\dot{Q}_{Thomson,p} = \sigma_p(T_h - T_c)I \quad (23)$$

Por otro lado, en el semiconductor n, el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen el mismo sentido, por lo que si el coeficiente Thomson  $\sigma_n$  es positivo, se genera una cantidad de calor por efecto Thomson:

$$\dot{Q}_{Thomson,n} = \sigma_n(T_h - T_c)I \quad (24)$$

La generación de calor global por efecto Thomson se obtiene sumando ambas ecuaciones:

$$\dot{Q}_{Thomson} = (\sigma_n - \sigma_p)(T_h - T_c)I \quad (25)$$

Por último, la diferencia de temperatura entre los extremos ( $T_h - T_c$ ), provoca una transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, cuyo valor se obtiene resolviendo la ecuación general de transmisión de calor.

### 3.4.3. Expresiones que gobiernan el funcionamiento de un módulo termoeléctrico

Tomando como referencia el estudio de un elemento termoeléctrico arriba desarrollado, se va a explicar el funcionamiento de un módulo Peltier como generador.

Sea una fuente de calor conectada directamente a una de las caras de un módulo Peltier, de la cual recibe un flujo constante de calor  $\dot{Q}_h$  que hace que las uniones metálicas interiores de esta cara se mantengan a una temperatura constante  $T_h$ . Por otro lado, las uniones metálicas interiores de la otra cara se mantienen a una temperatura  $T_c$ , emitiendo al exterior un flujo de calor  $\dot{Q}_c$ . En estas condiciones, aparece una fuerza electromotriz  $E_t$  de valor:

$$E_t = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \quad (26)$$

Si se cierra el circuito mediante una resistencia de carga  $R_L$ , se puede dibujar una analogía eléctrica similar a la anterior (figura 8). En este caso,  $R_0$  se refiere a la resistencia eléctrica de todo el módulo Peltier, y está formada por la suma de las resistencias eléctricas de cada uno de los  $N$  elementos termoelectricos:

$$R_0 = N(R_p + R_n + R_{uniones}) = N(\rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} + 2 \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + 2 \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n}) \quad (27)$$

Las expresiones de la diferencia de potencial  $V$ , la intensidad de corriente  $I$  y la potencia consumida por la resistencia de carga  $P$  quedan:

$$V = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - \alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{m}{m+1} \quad (28)$$

$$I = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - \alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (29)$$

$$P = N^2[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - \alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (30)$$

Aplicando el primer principio de la termodinámica al conjunto, se obtiene que:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + P \quad (31)$$

Debido al efecto Peltier, al pasar la corriente generada por el circuito, se produce una absorción de calor en todas las uniones de la parte más caliente del módulo:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = N(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h I \quad (32)$$

En las uniones de la cara fría, se produce una generación de calor de valor:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c I \quad (33)$$

Las pérdidas de calor por efecto Joule representan la suma de las pérdidas en cada uno de los elementos, por lo que su valor es:

$$\dot{Q}_{Joule} = N * I^2 R_0 \quad (34)$$

Este término está compuesto por las pérdidas en todos los semiconductores:

$$\dot{Q}_J = N * I^2 \left( \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \right) \quad (35)$$

Hay que sumar las pérdidas de calor por efecto Joule en las uniones del lado caliente y frío entre todos ellos:

$$\dot{Q}_{Contacto,h} = N * I^2 \left( \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{Contacto,c} = N * I^2 \left( \frac{\rho_{unión,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{unión,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (37)$$

Debido al efecto Thomson, se genera un flujo de calor de valor:

$$\dot{Q}_{Thomson} = N * (\sigma_n - \sigma_p)(T_h - T_c)I \quad (38)$$

Por último, la diferencia de temperatura entre caras ( $T_h - T_c$ ), provoca una transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, cuyo valor se obtiene solucionando la ecuación general de transmisión de calor.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (39)$$



### 3.4.4. Modificación de las ecuaciones teniendo en cuenta las características de un módulo común

En la mayoría de los módulos Peltier comerciales, se dan una serie de relaciones entre sus elementos que permiten simplificar todas las ecuaciones anteriores. Estas relaciones son:

- Es común que los semiconductores  $p$  y  $n$  tengan exactamente la misma longitud ( $L$ ) y la misma área transversal ( $A$ ).

$$L_p = L_n = L$$

$$A_p = A_n = A$$

- El material de unión en los extremos calientes y en los fríos también es el mismo, por lo que:

$$\rho_{unión,p}^{superficial} = \rho_{unión,n}^{superficial} = \rho_{unión}^{superficial}$$

- Es frecuente que los semiconductores  $p$  y  $n$  estén compuestos del mismo material; simplemente se le modifica la cantidad de electrones (procedimiento de dopado) para obtener un semiconductor con exceso de ellos ( $n$ ) o con defecto ( $p$ ). Esto hace que no sea inexacto considerar las siguientes simplificaciones [8]:

$$\alpha_p = -\alpha_n = \alpha$$

$$\kappa_p = \kappa_n = \kappa$$

$$\rho_p = \rho_n = \rho$$

$$\sigma_p = -\sigma_n = \sigma$$

- Es común que el semiconductor  $p$ , presente un coeficiente Seebeck  $\alpha_p$ , estrictamente positivo y creciente con la temperatura; por eso, al aplicar la ecuación 3.6, se deduce que el coeficiente Thomson en el semiconductor  $p$  ( $\sigma_p$ ) es estrictamente negativo. Al aplicar la misma ecuación en el semiconductor  $n$ , se obtiene que  $\sigma_n$  es estrictamente positivo, [12].

Con estas relaciones, las ecuaciones para el módulo Peltier que se han desarrollado anteriormente, quedan de la siguiente forma:

*Esta son las relaciones que se utilizan en el modelo de cálculo matemático desarrollado por el Dpto. de Termotecnia de la Universidad Pública de Navarra.*

Fuerza electromotriz generada y resistencia eléctrica interna en cada módulo:

$$E_t = 2 * N[\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma| * (T_h - T_c)] \quad (40)$$

$$R_0 = 2 * N\left(\rho \frac{L}{A} + 2 * \frac{\rho_{unión}^{superficial}}{A}\right) \quad (41)$$

Intensidad que circula por el circuito, diferencia de potencial en RL y potencia de salida en ella:

$$V = 2 * N[\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma| * (T_h - T_c)] \frac{m}{m+1} \quad (42)$$

$$I = 2 * N[\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma| * (T_h - T_c)] \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (43)$$

$$P = 4 * N^2[\alpha_h T_h - \alpha_c T_c - |\sigma| * (T_h - T_c)]^2 \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (44)$$

Calor absorbido en la junta caliente por efecto Peltier:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = 2N\alpha_h T_h I \quad (45)$$

Calor generado en la junta fría por efecto Peltier:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = 2N\alpha_c T_c I \quad (46)$$

Pérdidas de calor por efecto Joule en los semiconductores:

$$\dot{Q}_J = 2NI^2 \rho \frac{L}{A} \quad (47)$$

Pérdidas de calor por efecto Joule en las uniones entre ellos:

$$\dot{Q}_{Contacto,h} = 2NI^2 \frac{\rho_{unión}^{superficial}}{A} \quad (48)$$

$$\dot{Q}_{Contacto,c} = 2NI^2 \frac{\rho_{unión}^{superficial}}{A} \quad (49)$$

Debido al efecto Thomson, se genera un flujo de calor en el interior del módulo Peltier, de valor:

$$\dot{Q}_{Thomson} = 2N|\sigma|(T_h - T_c)I \quad (50)$$

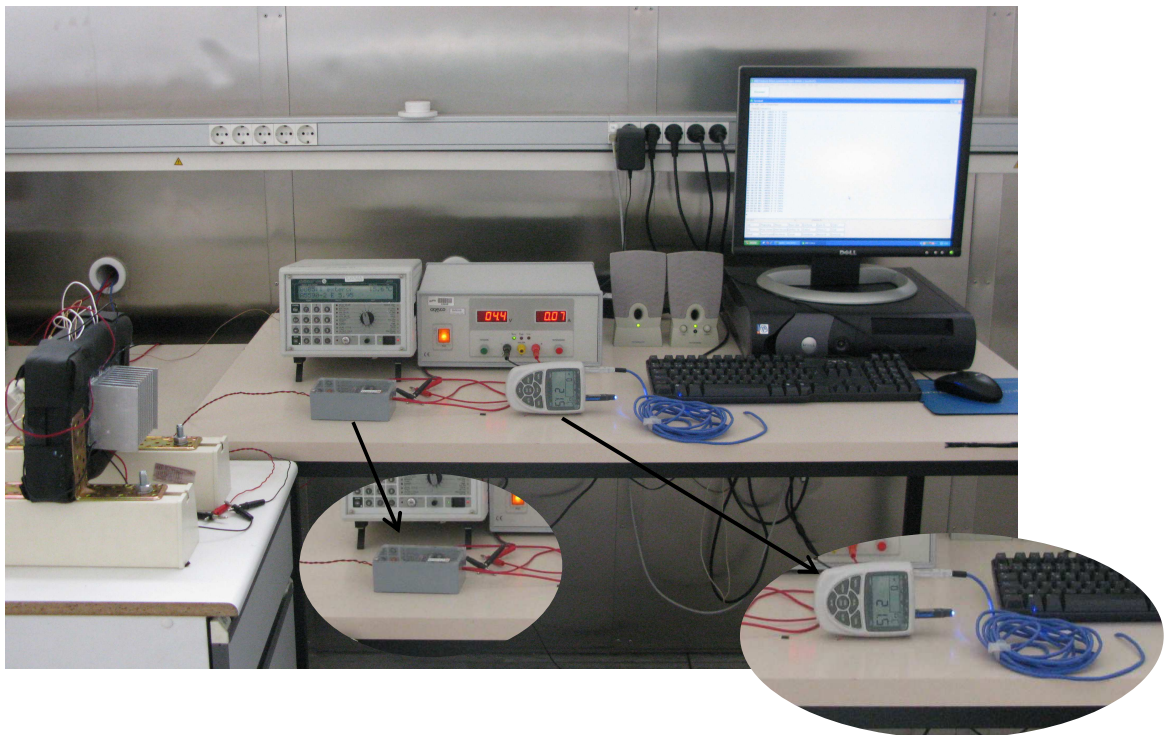
Por último, la diferencia de temperatura entre caras ( $T_h-T_c$ ), provoca una transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, cuyo valor se obtiene solucionando la ecuación general de transmisión de calor (3.39).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (51)$$



#### 4. Estructura del banco de ensayos de pruebas de generación termoeléctrica para alimentar sondas autónomas

Para la realización de los ensayos experimentales, partimos del prototipo de pruebas construido para un proyecto fin de carrera anterior. El banco de pruebas consta, como se observa en la figura 9, de el generador termoeléctrico y el equipo de medida compuesto por el dispositivo de medida y el ordenador, que se encarga de la captura de los datos. Posteriormente, conectaremos la electrónica, que consta de un convertidor doble *boost* que nos permite trabajar en el punto óptimo del generador termoeléctrico y a su vez, nos amplifica la tensión y reduce la corriente de salida.



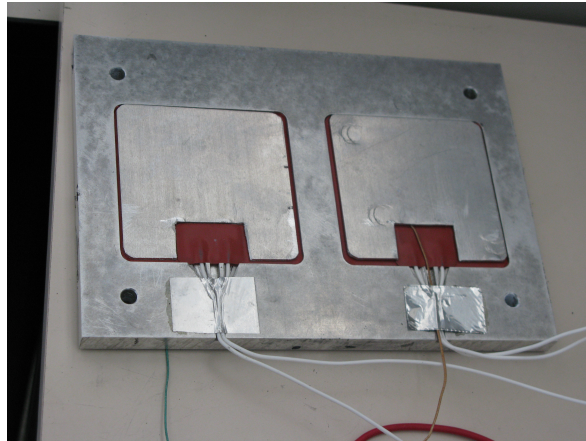
**Figura 9:** Banco de ensayos

##### 4.1. ESTRUCTURA DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO

###### 4.1.1. Placas de aluminio con resistencias en su interior

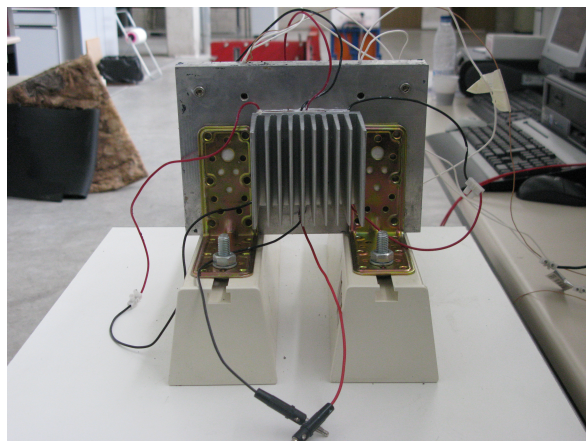
La simulación del flujo de calor de los humos de la chimenea lo realizamos mediante unas resistencias. Para ello, colocamos los módulos y el disipador sobre una placa de

aluminio y en su interior colocamos dos resistencias de 200 W cada una, que irán conectadas a la fuente de alimentación. De esta forma simulamos el flujo de calor.



**Figura 10:** Resistencias que simulan el flujo de calor

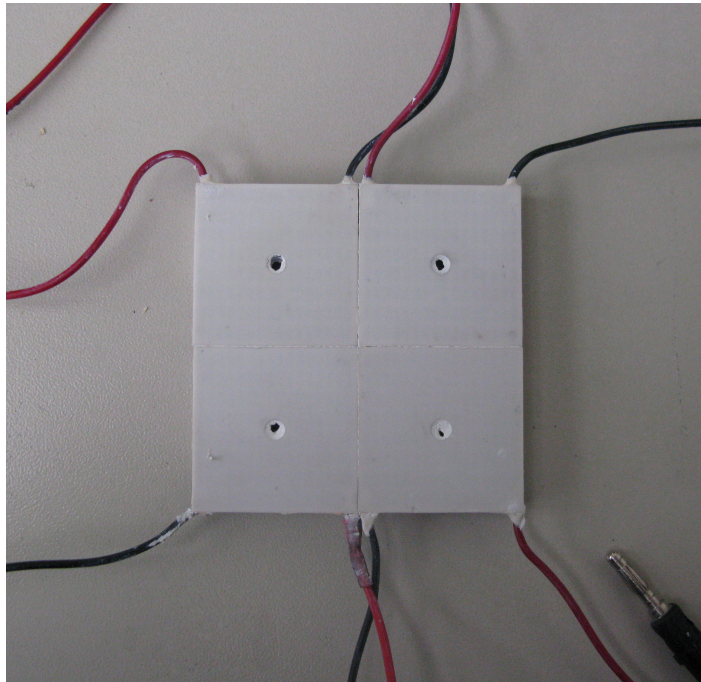
Por otra parte, para impedir la pérdida de calor a través de las placas de aluminio, aislamos todo el dispositivo con material aislante. Además, para obtener un buen contacto entre la placa de aluminio y la base del disipador, aplicamos pasta conductora entre estas dos superficies así como en los orificios donde están introducidas las sondas.



**Figura 11:** Generador termoeléctrico sin aislamiento

#### 4.1.2. Módulos Peltier

Tras diversos ensayos realizados en Fluent en investigaciones anteriores, se ha llegado a la conclusión de que el número óptimo de módulos es 4. Por lo tanto, se implantan 4 módulos Peltier Enerkit de 127 pares que abarcan una superficie total de  $81 \times 81 \text{ mm}^2$  y que tienen una superficie de cerámico de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ .



**Figura 12:** Módulos Peltier utilizados en el banco de ensayos

#### 4.1.3. Disipador

La elección del disipador óptimo es una de las piezas claves de este proyecto. Para ello disponemos de cinco disipadores, que a continuación describiremos. Tras la realización de ensayos con el banco de pruebas optaremos por el disipador que más potencia genere teniendo en cuenta la potencia requerida por el aparato de medida.

Cuatro de los cinco disipadores fueron comprados a la empresa Tecnoal, por lo que nos valdremos de sus características térmicas especificadas en el catálogo para tener una referencia en cuanto a la resistencia térmica. El quinto disipador fue comprado a

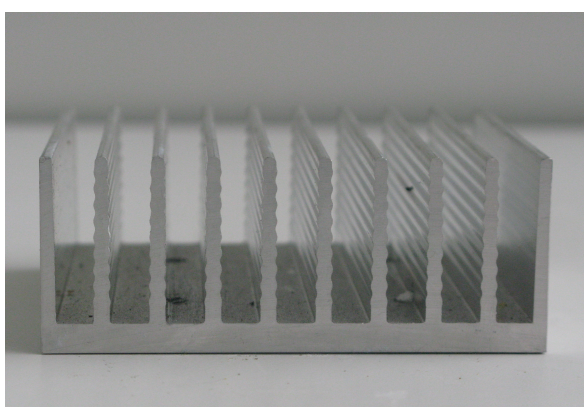


la empresa Enerkit, perteneciente al grupo Mondragón, y fue específicamente diseñado para este banco de ensayos.

Tenemos los siguientes disipadores:

- KE82

Este disipador tiene como longitud 82 mm de ancho, por lo que es idóneo para nuestros módulos peltier que abarcan un área de  $81 \times 81 \text{ mm}^2$ . De esta forma evitamos la resistencia de constricción.



**Figura 13:** Disipador KE82

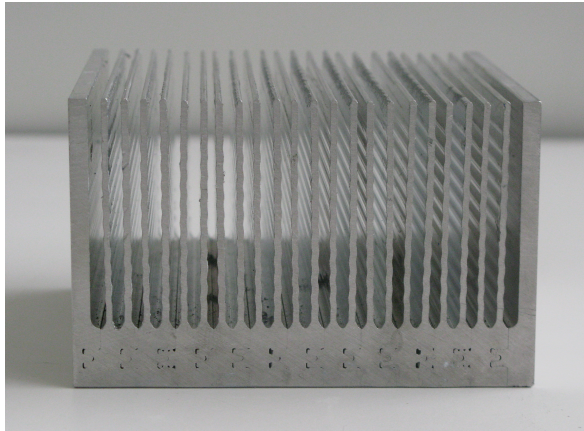
La empresa Tecnoal te permite elegir la longitud de largo del disipador por lo que el disipador tendrá una base de  $82 \times 82 \text{ mm}^2$ . Además, consta de 10 aletas de 32 mm de altura y separadas entre sí por una distancia de 6.9 mm.

El catálogo indica que este disipador tiene una resistencia térmica de 1.6 K/W para una longitud de 100 mm de largo. Como nuestro disipador tiene un largo algo menor, la resistencia térmica aumentará un poco.

- ENERKIT

Este disipador fue específicamente diseñado para este banco de ensayos. Tiene una base de  $81 \times 81 \text{ mm}^2$  para evitar la resistencia de constricción. Consta de 20 aletas de 50 mm de altura separadas entre sí por una distancia de 2 mm. Inicialmente las aletas venían unidas dos a dos, pues se pensó para el estudio en convección forzada. Así pues, decidimos cortar las aletas para aumentar el área y conseguir mayor salto de temperaturas.



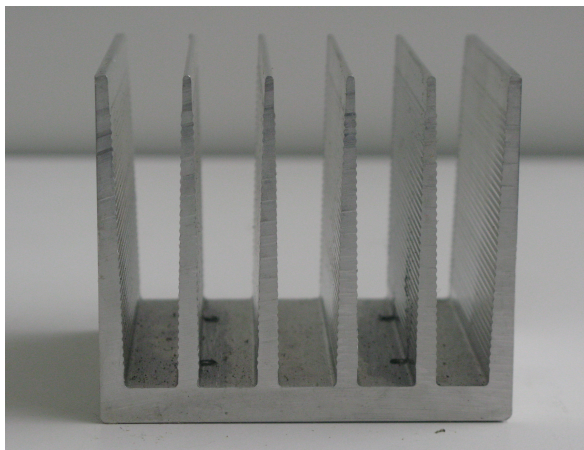


**Figura 14:** Disipador Enerkit

La empresa Enerkit nos proporcionó el valor de la resistencia térmica de este disipador, teniendo un valor aproximado de 0.7 K/W.

- KEA82

Este disipador también tiene una longitud de ancho de 82 mm por lo que la base será de  $82 \times 82 \text{ mm}^2$ . Consta de 6 aletas de 69 mm de altura y separadas entre sí por una distancia de 14 mm.

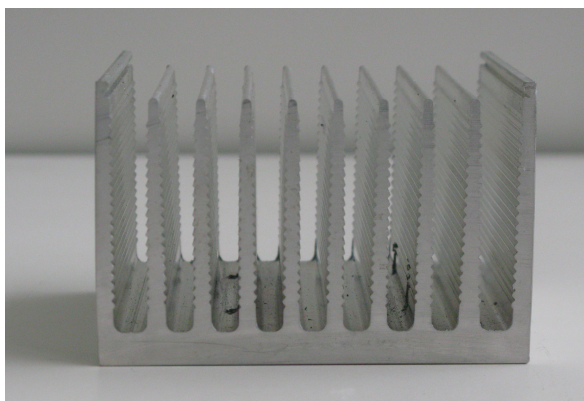


**Figura 15:** Disipador KEA82

El catálogo indica que este disipador tiene un resistencia de 1.10 K/W para una longitud de 100 mm de largo. Como nuestro disipador tiene un largo un tanto menor, la resistencia térmica aumentará levemente.

- K92

Este disipador tiene una longitud de ancho de 92 mm por lo que la base será de  $92 \times 82 \text{ mm}^2$ . Consta de 10 aletas de 60.5 mm de altura y separadas entre sí por una distancia de 8 mm.



**Figura 16:** Disipador K92

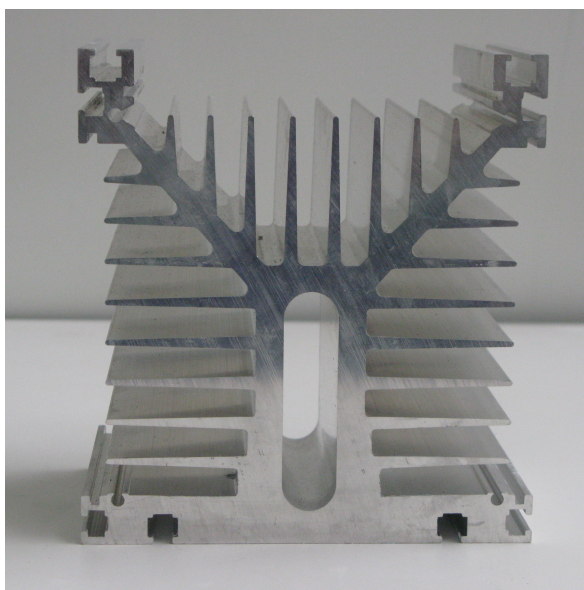
El catálogo indica que este disipador tiene una resistencia de 1.16 K/W para una longitud de 100 mm de largo. Como nuestro disipador tiene un largo un tanto menor, la resistencia térmica aumentará levemente.

- A135

El disipador A135 tiene una longitud de 125 mm por lo que la base será de  $125 \times 82 \text{ mm}^2$ . Puede que la resistencia de constricción aumente de forma considerable disminuyendo así la potencia obtenida, pero teniendo en cuenta el bajo valor de su resistencia térmica, 0.5 K/W, consideramos que puede ser un disipador idóneo para el banco.

Tiene una altura de 135 mm, con numerosas aletas posicionadas de forma vertical y horizontal, así como una oquedad en la parte central que mejora el área de transmisión de calor.

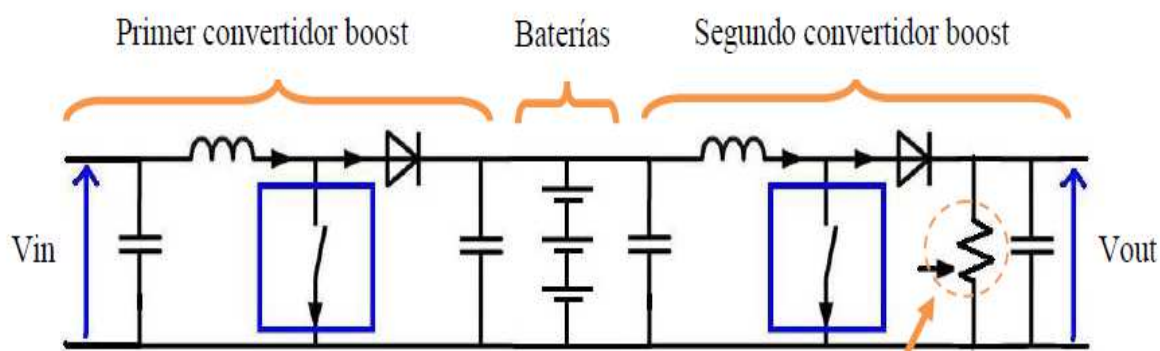
Debido a sus voluminosas dimensiones, puede que por motivos constructivos no se pueda implantar en la chimenea de la central térmica. Aún así, lo estudiaremos.



**Figura 17:** Disipador A135

#### 4.2. ELECTRÓNICA

El principal inconveniente que tenemos con el generador termoelectrico es que genera una potencia con una tensión muy baja, por lo que es imposible alimentar a aparatos electrónicos de medida. Para solventar este problema, se pensó en un convertidor doble-boost, que a la vez de aumentar la tensión de salida hasta valores admisibles de uso, además hace que el generador termoelectrico trabaje en el punto óptimo.



**Figura 18:** Esquema eléctrico del convertidor doble-boost



**Figura 19:** Convertidor doble-boost

El convertidor doble-boost consta de dos etapas. En la primera, el primer boost amplía la señal procedente de los módulos Peltier hasta los 5 V necesarios para alimentar a tres pilas recargable, y la segunda etapa se encarga de ampliar la señal procedente de las pilas hasta la tensión de salida deseada, pues se puede regular gracias a un potenciómetro que viene incorporado.

Un conector de suministro de energía habitual normalmente no se puede conectar directamente a dispositivos como ordenadores, relojes o teléfonos. La conexión de suministro genera una tensión alterna (AC) y los dispositivos requieren tensiones continuas (DC). La conversión de potencia permite que dispositivos de continua utilicen energía de fuentes de alterna, este es un proceso llamado conversión AC a DC y en él se usan convertidores AC a DC como rectificadores.

La energía también puede provenir de fuentes DC como baterías, paneles solares, rectificadores y generadores DC (como es el caso de este proyecto), pero ser de niveles inadecuados. El proceso de cambiar una tensión de continua a otra diferente es llamado conversión DC a DC. Un convertidor Boost es uno de los tipos de convertidores DC a DC. Presenta una tensión de salida mayor que la tensión de la fuente, pero la corriente de salida es menor que la de entrada.

La mayor ventaja de esta arquitectura de convertidor es la posibilidad de aumentar la tensión de salida respecto de la de entrada en un factor de hasta 10 sin necesidad

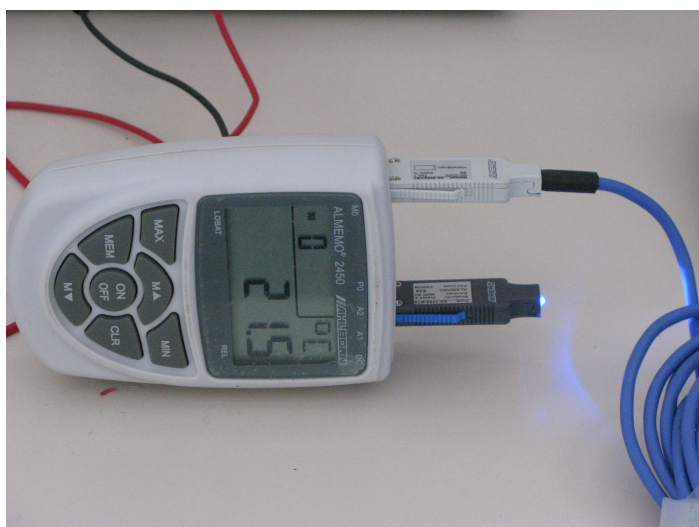
de transformador. La utilización de un inductor es normalmente más económica en comparación a la necesidad de un transformador.

Sin embargo, uno de los inconvenientes de esta estructura es que no está protegido ante cortocircuitos en la salida, dado que el diodo realiza una conexión directa entre la entrada y la salida.

En este proyecto se ha utilizado un convertido doble-boost y no uno simple pues si se hiciera en una sola etapa el rendimiento del circuito sería muy bajo. El esquema del circuito se muestra en la figura 22.

#### 4.3. APARATO DE MEDIDA

El aparato de medida seleccionado, que será alimentado por el generador termoeléctrico y que será el encargado del control de la temperatura de la chimenea de la central de biomasa, es un ALMEMO 2450-1/L. Este instrumento de medida consta de una entrada, es decir, sólo puede tomar medida de un valor, ya sea temperatura, presión, humedad, etc. En nuestro caso, conectamos una sonda de temperatura.



**Figura 20:** Aparato de medida

Además, tiene la posibilidad de conectarle un sistema bluetooth, gracias al cual, es capaz de enviar los datos que mide a un ordenador que los registra mediante el programa AMR- Control Data.



También, debemos mencionar, que el programa AMR- Control Data permite elegir el tiempo de emisión de los datos, es decir, podemos decidir cada cuánto tiempo nuestro aparato de medida envía al ordenador los datos de temperatura capturados.

Como ya analizaremos más adelante en el apartado 8, el aparato de medida necesita para funcionar unos 300 mW con 4,5 V de tensión, por lo que en el convertidor doble-boost, a través del potenciómetro, pondremos 4.5 V de tensión de salida.

#### 4.4. ADQUISIDOR DE DATOS

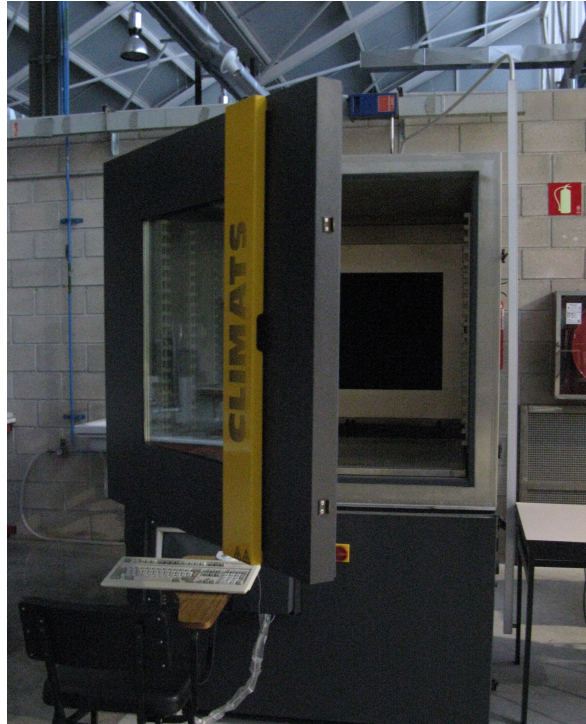
Para recoger los datos de temperaturas de las sondas instaladas, utilizamos el adquisidor de datos ALMEMO 5690. Este aparato consta de 9 entradas para conectar diferentes tipos de sondas.



**Figura 21:** Adquisidor de datos

Además, este adquisidor se puede conectar al ordenador y mediante el programa AMR- Control Data recoge todos los datos que las sondas adquieren y a su vez te muestra por pantalla una gráfica que te representa a lo largo del tiempo los valores que se van adquiriendo. Además, el programa te permite controlar cada cuánto tiempo el adquisidor toma los datos.

## 4.5. CÁMARA CLIMÁTICA



**Figura 22:** Cámara climática

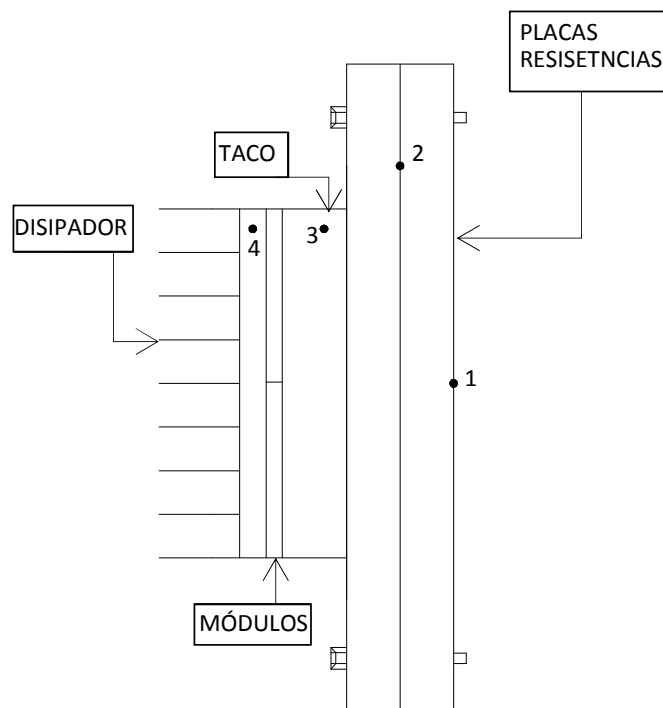
Utilizamos la cámara climática para conseguir una temperatura ambiente constante, con el fin de que dicha temperatura no influya en los diferentes ensayos, y así no introducir otra variable al sistema. Así pues, ensayaremos a dos temperaturas ambientes, una a 7 °C para simular las condiciones climáticas de invierno, y otra a 20 °C para simular condiciones climáticas de verano.

## 4.6. SONDAS

Para la realización de los ensayos introducimos sondas de temperatura en los puntos más interesantes del banco de pruebas, que se pueden observar en la figura 23:

- **Exterior placa de aluminio.**(1)
- **Interior de la placa de aluminio:** Con este punto controlamos a la temperatura a la que están las resistencias para no superar la temperatura de fusión del material que las recubre.(2)

- **Cara caliente de los módulos Peltier.**(3)
- **Cara fría de los módulos Peltier:** Utilizamos una sola sonda para medir la temperatura del disipador y de la cara fría de los módulos. Suponemos que la sonda está situada exactamente en la superficie de contacto entre el disipador y los módulos, aunque en realidad, por motivos de construcción, no está exactamente en esa superficie.(4)
- **Temperatura del aislante:** Con el fin de controlar cuánto calor se puede disipar por el aislante, introducimos una sonda en él para tener este parámetro controlado y tenerlo en cuenta.
- **Temperatura ambiente**



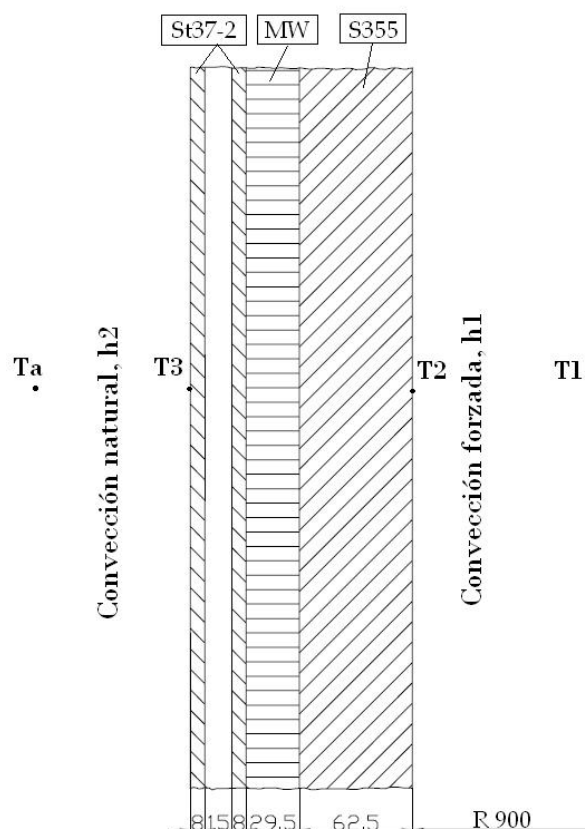
**Figura 23:** Esquema colocación de las sondas



## 5. Estudio de las posibles configuraciones del generador termoeléctrico para su instalación en la chimenea de la central térmica de Sangüesa

El grupo Acciona nos proporcionó toda la información necesaria sobre la chimenea de la central de biomasa de Sangüesa, así como los planos de la misma. La figura 24 muestra la sección donde irá instalado el generador termoeléctrico. Esta zona de la chimenea es la que la central tiene habilitada para la instalación de dispositivos de medida. Se encuentra a una cota aproximadamente de 25.6 m respecto al suelo.

Además debemos mencionar, que entre las dos secciones de acero St37-2, existe una oquedad pues la chimenea tiene una coraza exterior. La posible convección que en ese hueco pudiera existir, la despreciamos, pues al ser su espesor muy pequeño no habrá apenas movimiento de aire. Con el fin de realizar un estudio más completo, decidimos realizar las pruebas con el banco de ensayos para dos temperaturas ambiente, una simulando las condiciones climáticas en el período estivo, y otra, para el período invernal.



**Figura 24:** Sección de la chimenea

Así pues, procedemos al análisis de las posibles configuraciones para su instalación en la central.

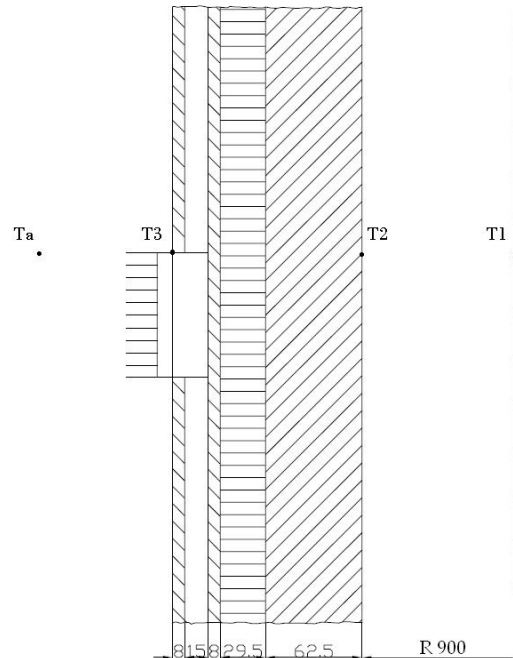
### 5.1. CONFIGURACIÓN I: GENERADOR TERMOELÉCTRICO EN LA PARED EXTERIOR DE LA CHIMENEA

En la figura 25 se muestra la primera configuración. La chimenea consta de un primer cilindro de espesor 62.5 mm y de acero S355. A continuación, de forma concéntrica viene cubierto por un aislante de 29.5 mm de espesor con el objetivo de evitar pérdidas de calor. Finalmente la chimenea es recubierta por otro cilindro de acero St37-2 de 8 mm

de espesor. Además, esta chimenea tiene una coraza exterior dejando una oquedad de 15 mm entre la chimenea y la coraza.

En la primera configuración, el generador termoeléctrico viene instalado en la cara exterior de la chimenea. Así pues deberemos instalar un taco de espesor igual al grosor de la coraza exterior más el espesor la oquedad.

En el Anexo A, viene mostrado todo el cálculo realizado para estimar los coeficientes de convección en la chimenea. Así pues, de forma más detallada procedemos a calcular la temperatura  $T_3$ , que es la que nos interesa pues corresponde a la temperatura que adoptarán las caras calientes de los módulos.



**Figura 25:** Sección de la chimenea con el dispositivo en la disposición I

#### Condiciones climáticas invernales

Basándonos en las fichas que la Agencia Estatal de Meteorología realiza de las diferentes estaciones climáticas, realizamos una media de las temperaturas medias en los meses invernales y obtenemos una temperatura ambiente de 7 °C para la estación climatológica de Javier, la más cercana a la localidad de Sangüesa. [13]

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}$  ,  $k_1 = 54 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}$  ,  $k_2 = 0.04 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}$  ,  $k_3 = 50 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}$  ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}$  ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$

- $T_1 = 140^\circ C$ ,  $v = 14 \text{ m/s}$ ,  $L = 49.7 \text{ m}$
- $h_1 = 25.467 \text{ W/Km}^2$
- $h_2 = 0.9724 \text{ W/Km}^2$
- $T_a = 7^\circ C$
- $L = 49.7 \text{ m}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.467} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{209} + \frac{0.008}{209} + \frac{1}{0.9724}$$

$$U = 0.5535 \text{ W/Km}^2$$

$$Q_{a-1} = Q_{a-3}$$

$$U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.5535 * (140 - 7) = 0.9724 * (T_3 - 7)$$

$$\boxed{T_3 = 82.7^\circ C}$$

### Condiciones climáticas estivales

El proceso será el mismo que el realizado en el apartado anterior. Así pues, mostramos los resultados a fin de no repetir el mismo procedimiento.

$$U = 0.53956 \text{ W/Km}^2$$

$$Q_{a-1} = Q_{a-3}$$

$$U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.53956 * (140 - 20) = 0.903025 * (T_3 - 20)$$

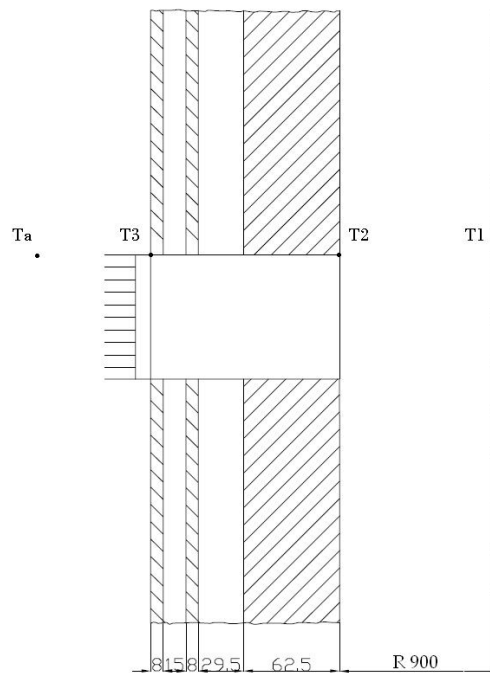
$$T_3 = 87.2^\circ C$$

## 5.2. CONFIGURACIÓN II: GENERADOR TERMOELÉCTRICO EN LA PARED INTERIOR DE LA CHIMENEA

En la figura 26 se muestra la segunda configuración que llevaremos a estudio. En esta ocasión, decidimos instalar el generador termoeléctrico en la pared interior de la chimenea. Así pues, el taco de aluminio deberá tener un espesor igual al espesor total de la chimenea, incluyendo también la coraza exterior.

De esta forma, la cara caliente de los módulos estarán a una temperatura más alta, obtendremos más salto de temperatura y por consecuencia más generación de potencia.

Realizamos el mismo procedimiento que en el apartado anterior, basándonos en los cálculos realizados en el anexo A.



**Figura 26:** Sección de la chimenea con el dispositivo en la disposición II

### Condiciones climáticas invernales

$$U = 0.93612 W/Km^2$$

$$Q_{a-1} = Q_{a-3}$$

$$U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.93612 * (140 - 7) = 0.9724 * (T_3 - 7)$$

$$T_3 = 135.03^\circ C$$

### Condiciones climáticas estivales

$$U = 0.89684 W/Km^2$$

$$Q_{a-1} = Q_{a-3}$$

$$U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.89684 * (140 - 20) = 0.903025 * (T_3 - 20)$$

$$T_3 = 139.178^\circ C$$

Como ya hemos explicado en el apartado 4.1.1, para la simulación del flujo de calor, utilizamos dos resistencias de 200 W cada una, que están en el interior de dos placas unidas mediante una unión atornillada.

Por motivos constructivos, no podemos superar los 12 V y 7A en la fuente de alimentación, pues el recubrimiento que llevan dichas resistencias podría quemarse. Así pues, teniendo esta limitación, será muy difícil llegar a 135 °C o 139 °C en la cara caliente de los módulos, por lo que la configuración II, será una línea de futuro para próximas investigaciones.



## 6. Estudio experimental de las curvas de funcionamiento V-I, P-I, P-R en función del tipo de disipador y de las condiciones climáticas

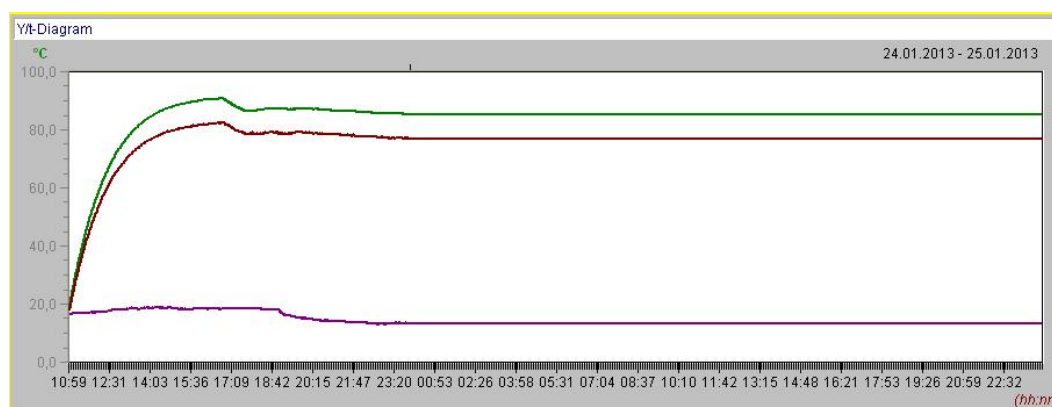
En este apartado vamos a exponer los resultados obtenidos para cada tipo de disipador y condiciones climáticas estudiadas. Vamos a describir los pasos realizados para llevar a cabo una sola vez, con la intención de no repetir demasiado. Así pues, realizaremos el análisis profundo para el disipador KE82 en condiciones climáticas de verano y para los demás casos sólo mostraremos los resultados.

### 6.1. CONFIGURACIÓN I Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE VERANO

Como ya hemos expresado en el apartado 5, hemos realizado el estudio de la configuración I para dos condiciones climáticas diferentes. En este caso, ensayamos con una temperatura ambiente de 20 °C aproximadamente, y como ya hemos mencionado en el subapartado 5.1, buscaremos una temperatura en la cara caliente de los módulos de 87,2 °C, que es la que tendría la pared exterior de la chimenea de la central con el generador termoelectrico instalado.

#### Disipador KE82

Así pues, para la realización de los ensayos nos valdremos del programa *AMR Control Data*, que a través de un adquisidor de datos, mantiene controlada las temperaturas de las sondas conectadas.



**Figura 27:** Visualización de la estabilización de temperaturas con el programa AMR

Una vez realizado el montaje del generador termoelectrico y de la introducción de las sondas en los puntos de interés, deberemos buscar el flujo de calor (dado por la fuente de alimentación) necesario para obtener  $87,2^{\circ}\text{C}$  en la cara caliente de los módulos. Este es el paso más problemático de todo el proceso de ensayo, pues al no saber, ni tener referencia alguna, la única alternativa es realizar un proceso iterativo en el cual se pone la fuente de alimentación a un determinado voltaje e intensidad, se espera a que las temperaturas se estabilicen y se aumenta o disminuye la intensidad y voltaje.

En la figura 27, se muestra el diagrama que el programa *AMR Data Control* te saca por defecto. En él puedes representar la curva de temperaturas de todas las sondas que se tienen en uso, pero en este caso, yo representé las curvas para las sondas de la cara caliente de los módulos, la cara fría y la temperatura ambiente.

Así pues, una vez que está el generador termoelectrico estabilizado, procedemos a realizar las curvas P-I, V-I. Para ello, iremos variando la resistencia de carga que conectamos a la salida del generador. Conectamos resistencias de valor entre  $2\ \Omega$  y  $580\ \Omega$ .

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	1.690	0	0
580	579.11	1.651	2.851	4.707
360	360.75	1.624	4.502	7.312
240	240.5	1.599	6.647	10.627
120	120.25	1.512	12.577	19.023
50	50.318	1.322	26.282	34.758
15	14.782	0.863	58.399	50.413
10	10.285	0.704	68.482	48.235
5	4.788	0.413	86.201	35.578
2	1.733	0.166	95.967	15.960

**Cuadro 2:** Resultados obtenidos con diferentes resistencias de carga

Para cada conexión de una resistencia, medimos su tensión gracias a un polímetro. Una vez obtenido el valor de la tensión, gracias a la Ley de Ohm, sabemos que  $V = I \cdot R$ , por lo que de esta ecuación despejamos  $I$  y obtenemos el valor de la intensidad. A su vez,  $P = I \cdot V$  por lo que obtenemos también el valor de la potencia generada para cada valor de la resistencia.

Debemos mencionar que esta toma de medidas no es instantánea. Cada vez que conectamos una resistencia, el flujo de calor se inestabiliza y por lo tanto las temperaturas

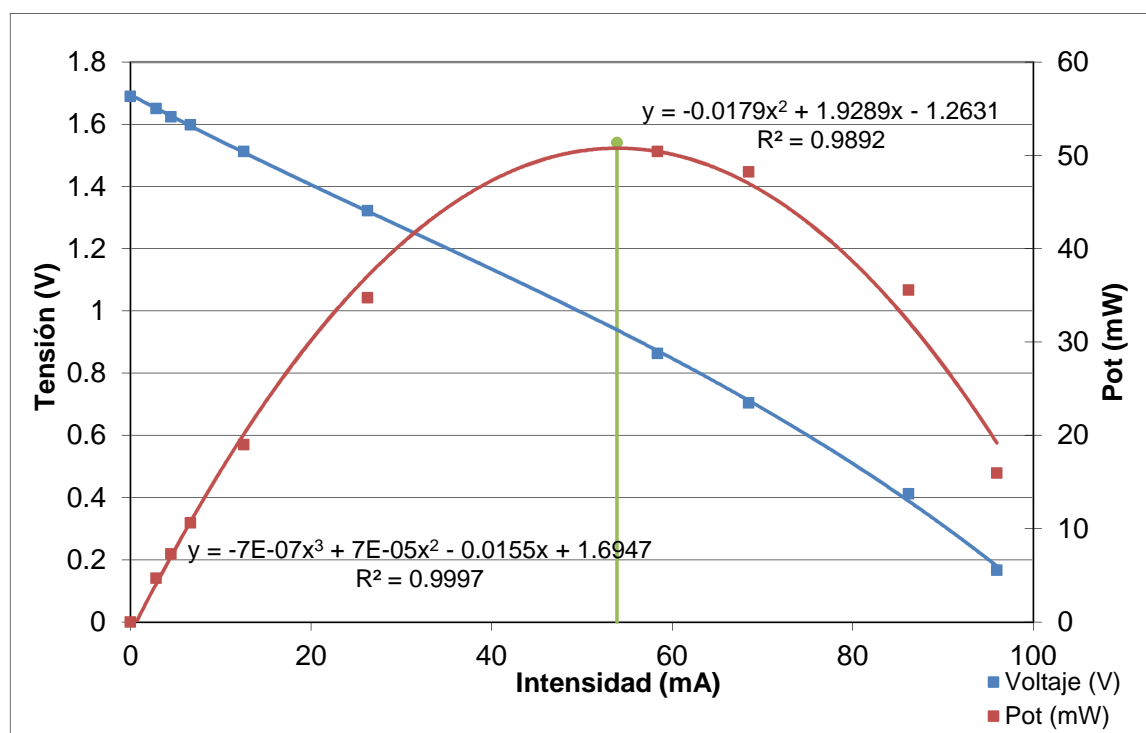


también. Así pues, deberemos esperar cierto tiempo a que los flujos de calor internos se estabilicen para poder tomar la medida de la tensión. A simple vista también se puede intuir, pues si mides la tensión cuando el flujo no esta estabilizado el valor que marca el polímetro está continuamente variando.

Una vez realizado el proceso de toma de medidas, tendremos la tabla que se muestra en la figura 2. A partir de estos datos representamos las curvas V-I, P-I y P-R que se muestran en las figuras 28 y 29.

MÓDULOS PELTIER	GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO	FLUJOS DE CALOR	EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	87.1	Tensión (V)	0.953
T cara fría (°C)	76.4	Intensidad (mA)	53.879
Salto T (°C)	10.7	Pot (mW)	51.363
		Fuente de alimentación (W)	37.68
		Pérdidas de calor (W)	7.493
		Calor absorbido por TEG (W)	30.187

**Cuadro 3:** Resultados obtenidos con el disipador KE82

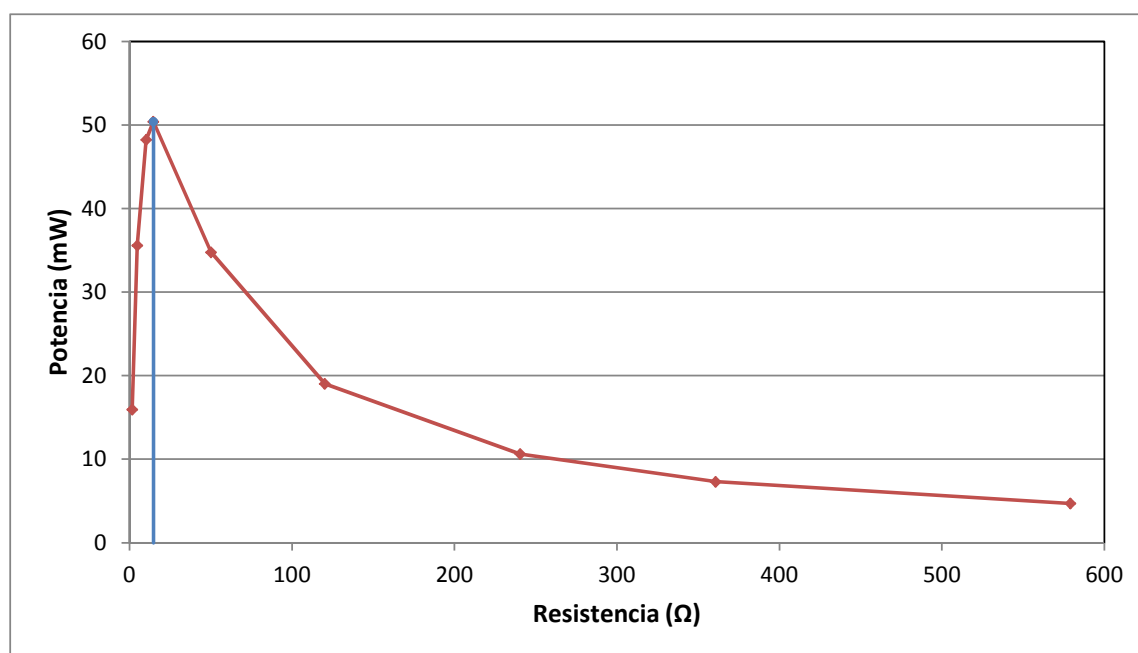


**Figura 28:** Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador KE82

En la tabla 3 tenemos resumidos los resultados que obtenemos con el disipador KE82. Para una temperatura ambiente de 7 °C y 87,1 °C en la cara caliente de los módulos

obtenemos un salto de temperaturas entre las caras de los módulos de  $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el punto óptimo, el generador termoeléctrico produce una potencia de  $51.363\text{ mW}$  con una tensión de  $0.953\text{ V}$  y  $53.879\text{ mA}$  de intensidad. Para obtener dicha temperatura en la cara caliente de los módulos, el TEG necesita un flujo de calor de  $30.187\text{ W}$  teniendo en cuenta las pérdidas que podemos tener a través del aislante. Por lo tanto, la eficiencia de este generador termoeléctrico es de  $0.17\%$ .

En la figura 28, tenemos representadas las curvas V-I y P-I. El trazo de color verde corresponde al punto óptimo del sistema. Llamamos *punto óptimo*, al punto en el cual el TEG genera la máxima potencia, y esto se produce cuando la resistencia de carga conectada es igual a la resistencia interna de los módulos. Como en todos los casos ensayados tenemos el mismo número de módulos, todos los TEG alcanzan el punto óptimo para la misma resistencia de carga. Los valores rondan entre los  $16\text{ y }17\text{ }\Omega$ .



**Figura 29:** Curva P-R obtenida con el disipador KE82

Para finalizar, en la figura 29 está representada la curva P-R, siendo R la resistencia de carga que conectamos al TEG. En esta gráfica podemos visualizar lo que hemos explicado en el párrafo anterior sobre el punto óptimo. Se observa que el generador alcanza la máxima potencia para una resistencia de carga en torno a las  $16\text{ }\Omega$ . Además, como sabemos, los aparatos electrónicos de baja potencia tienen una resistencia en torno a los  $600\text{ }\Omega$ . Si observamos la curva, vemos que a esa resistencia generaríamos

muy poca potencia, inviable para que el aparato electrónico funcionase. Es esta la razón por la que introducimos en nuestro sistema el convertidor doble-boost. De esta forma, conseguimos que el TEG trabaje en el punto óptimo y además amplifica la tensión de salida, siendo una solución más que óptima.

## Disipador ENERKIT

En el resto de ensayos se realiza el mismo procedimiento que el explicado en el apartado anterior. Así pues procedemos a explicar los datos obtenidos.

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA	
T cara caliente (°C)	87.4	Tensión (V)	1.028	Fuente de alimentación (W)	40.338	ε (%)	0.17
T cara fría (°C)	76.3	Intensidad (mA)	58.46	Pérdidas de calor (W)	4.569		
Salto T (°C)	11.1	Pot (mW)	60.085	Calor absorbido por TEG (W)	35.769		

**Cuadro 4:** Resultados obtenidos con el disipador ENERKIT

Con el disipador ENERKIT, obtenemos un salto de temperaturas entre las caras de los módulos de 11.1 °C. En el punto óptimo, genera 60.085 mW con una tensión de 1.028 V y 58.46 mA de intensidad. Para obtener 87.4 °C en la cara caliente de los módulos Peltier el TEG necesita 35.769 W teniendo en cuenta las pérdidas que se producen por el aislante. Así pues, este generador termoeléctrico tiene una eficiencia de 0.17 %.

Vemos que con este disipador tenemos un salto algo mayor que con el KE82 y producimos casi 10 mW más.

Sin embargo, tiene una eficiencia algo menor pues necesita más flujo de calor para obtener 87 °C en la cara caliente de los módulos. Esto tiene sentido, pues el disipador es algo mejor; tiene una resistencia térmica algo menor por lo que disipa más calor.

A la hora de la selección de disipador, la eficiencia no es del todo relevante pues nuestra fuente de calor, en el modelo final, es un calor residual que no será utilizado por el TEG, es desperdiciado.

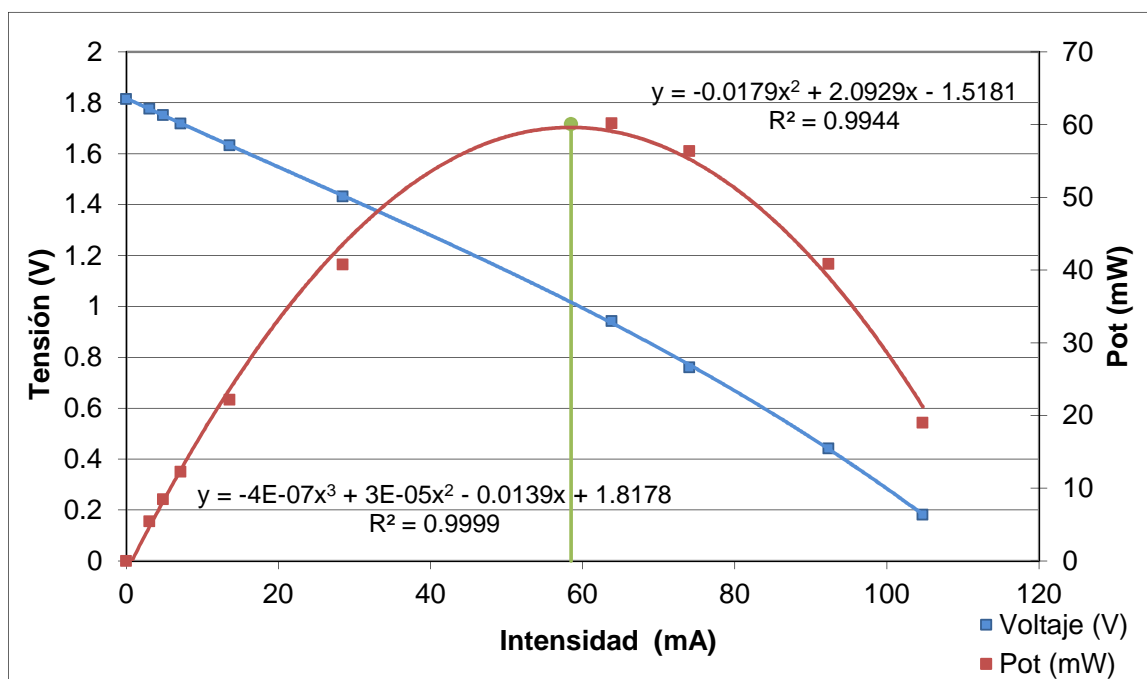


Figura 30: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador ENERKIT

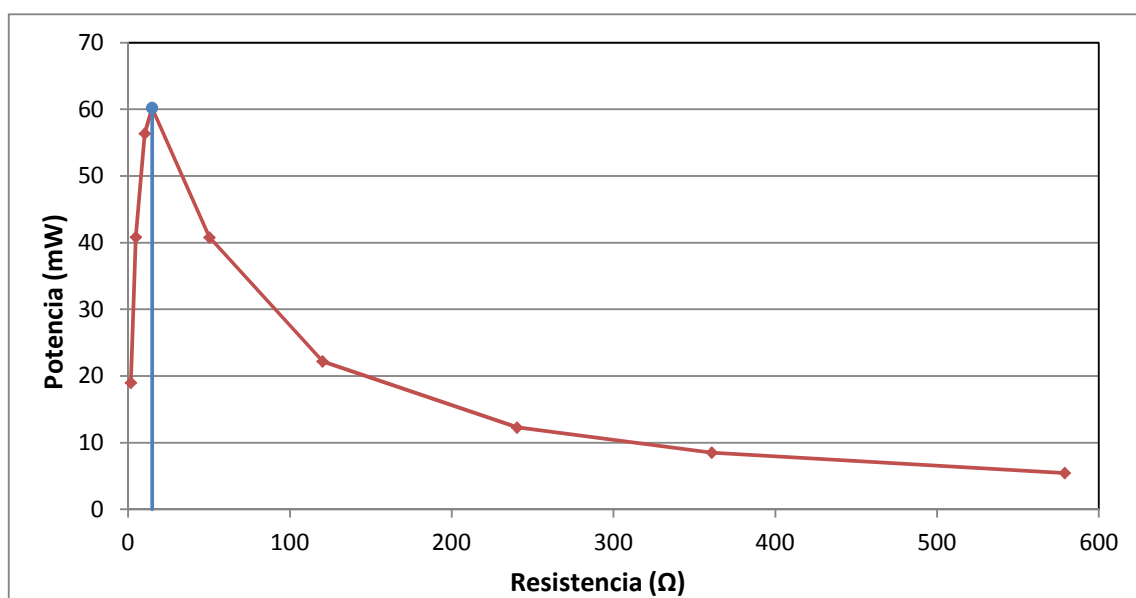


Figura 31: Curva P-R obtenida con el disipador ENERKIT

## Disipador KEA82

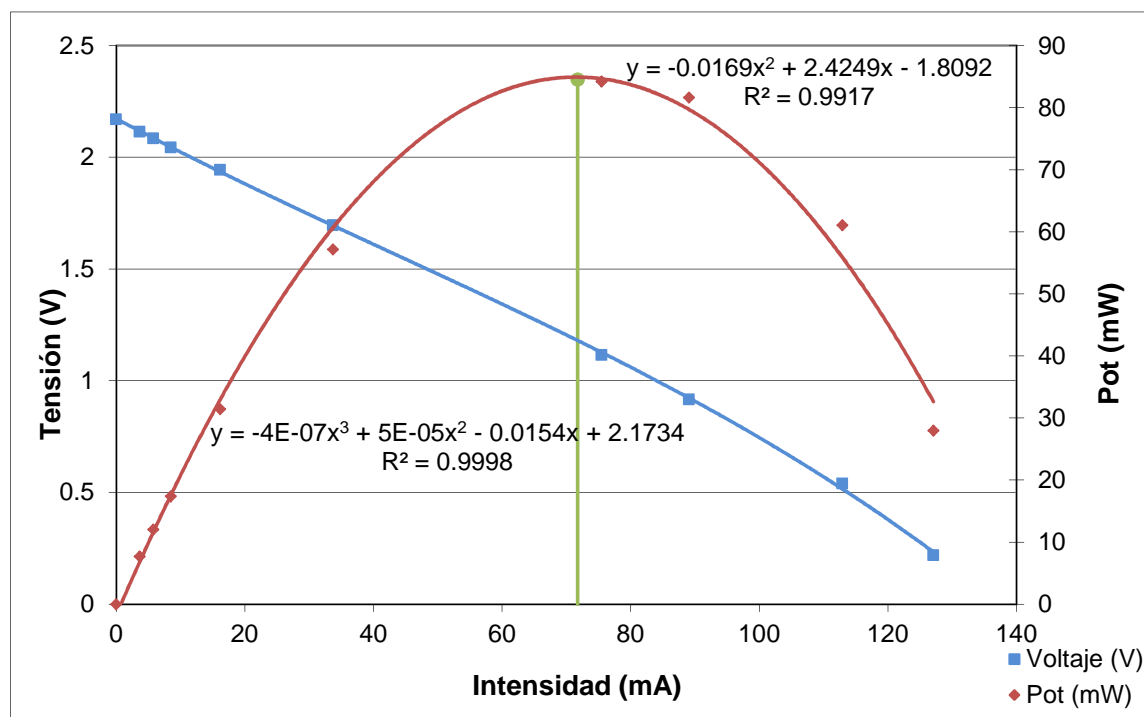


Figura 32: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador KEA82

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	87.7	Tensión (V)	1.178	Fuente de alimentación (W)	43.516	ε (%) 0.22
T cara fría (°C)	70	Intensidad (mA)	71.742	Pérdidas de calor (W)	5.239	
Salto T (°C)	17.7	Pot (mW)	84.528	Calor absorbido por TEG (W)	38.277	

Cuadro 5: Resultados obtenidos con el disipador KEA82

El generador termoelectrico con el disipador KEA82 consigue un salto de 17.7 °C y en el punto óptimo genera 84.528 mW con una tensión de 1.178 V y 71.742 mA de corriente.

Para obtener 87 °C en la cara caliente. el TEG necesita 38.277 W, teniendo en cuenta las pérdidas de calor por el aislante. Así pues, la eficiencia de este TEG es de 0.22, algo mayor que la obtenida con el disipador ENERKIT, pero la generación de potencia es bastante mayor llegando a producir 24 mW más.

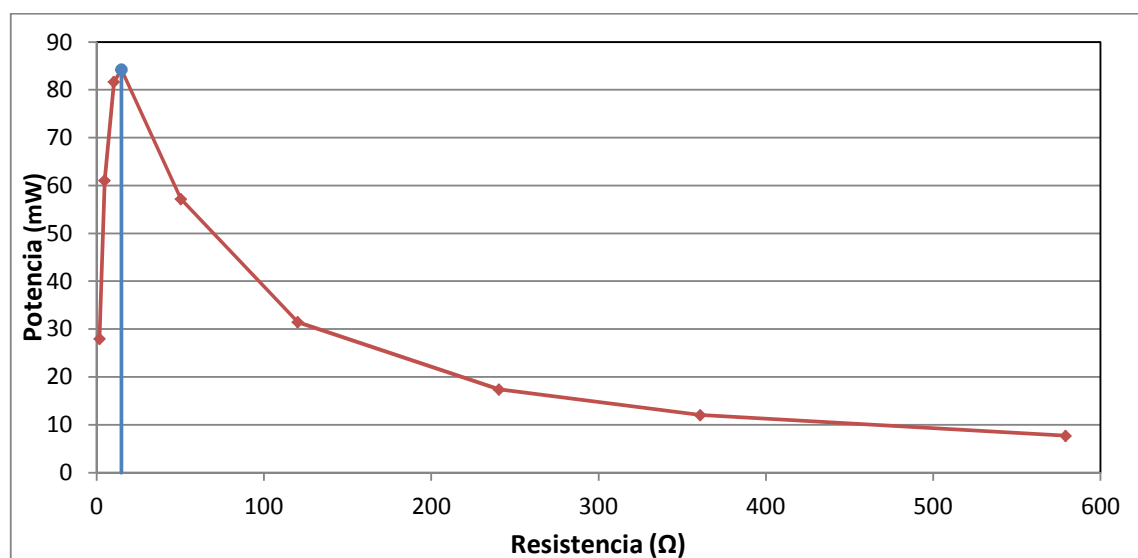


Figura 33: Curva P-R obtenida con el disipador KEA82

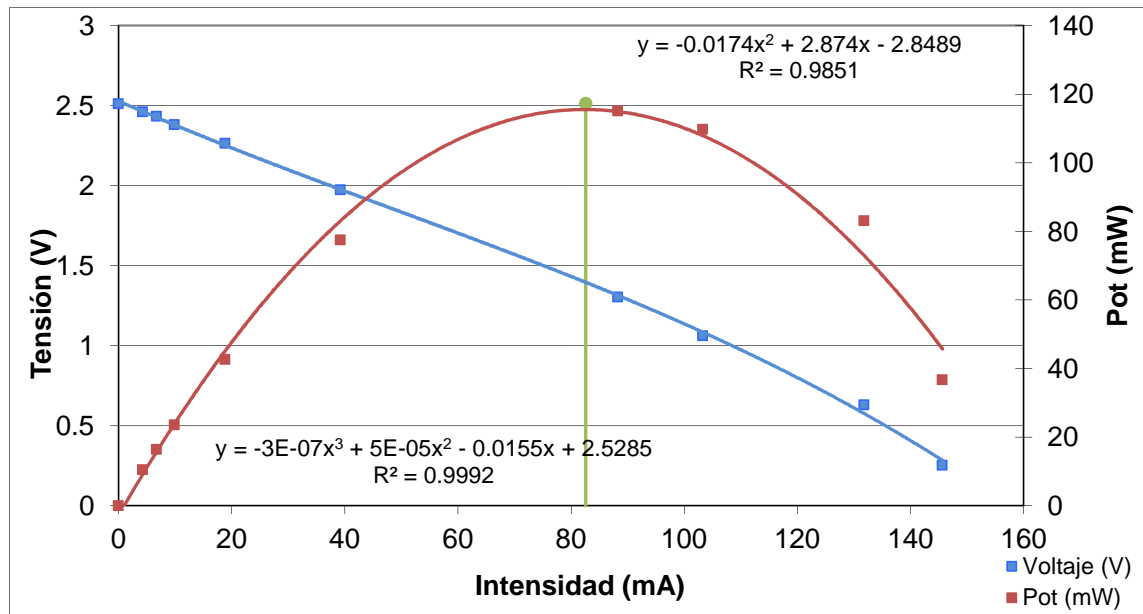
### Disipador K92

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	88.1	Tensión (V)	1.42	Fuente de alimentación (W)	49.496	ε (%) 0.26
T cara fría (°C)	69.9	Intensidad (mA)	82.58	Pérdidas de calor (W)	3.411	
Salto T (°C)	18.2	Pot (mW)	117.309	Calor absorbido por TEG (W)	46.085	

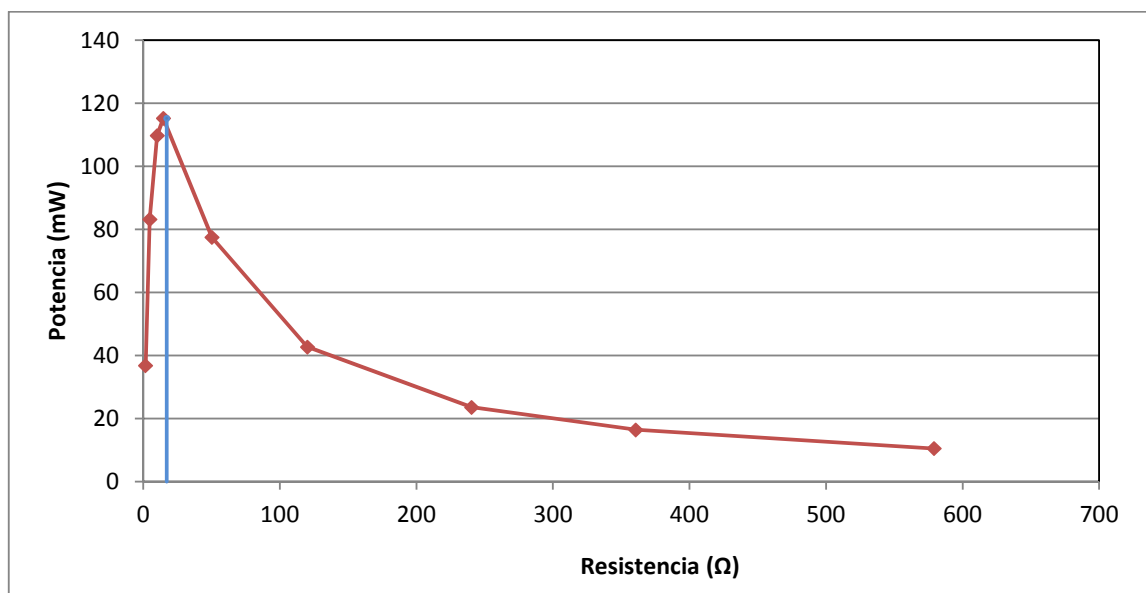
Cuadro 6: Resultados obtenidos con el disipador K92

Con el disipador K92 instalado obtenemos un salto de temperaturas de 18.2 °C, muy parecido al obtenido con el disipador KEA82, pero sin embargo, en el punto óptimo genera 117.309 mW, casi 40 mW más. Además, se observa que la eficiencia es también parecida, 0.26 %. Esto se debe a que el TEG necesita 46.085 W para obtener 87 °C en la cara caliente de los módulos por lo que, aunque genera más, la eficiencia es parecida pues absorbe más calor.

También, es debido mencionar que con este TEG, se disipa menos calor. Puede ser debido a que la temperatura ambiente haya sido un poco más alta que en los otros ensayos y de esta forma se ha disipado menos. Para finalizar, debemos mencionar que este disipador puede llegar a ser el idóneo para nuestro modelo final, pues sus dimensiones se adecuan a nuestro sistema y genera 117 mW, de momento el que más.



**Figura 34:** Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador K92



**Figura 35:** Curva P-R obtenida con el disipador K92

## Disipador A135

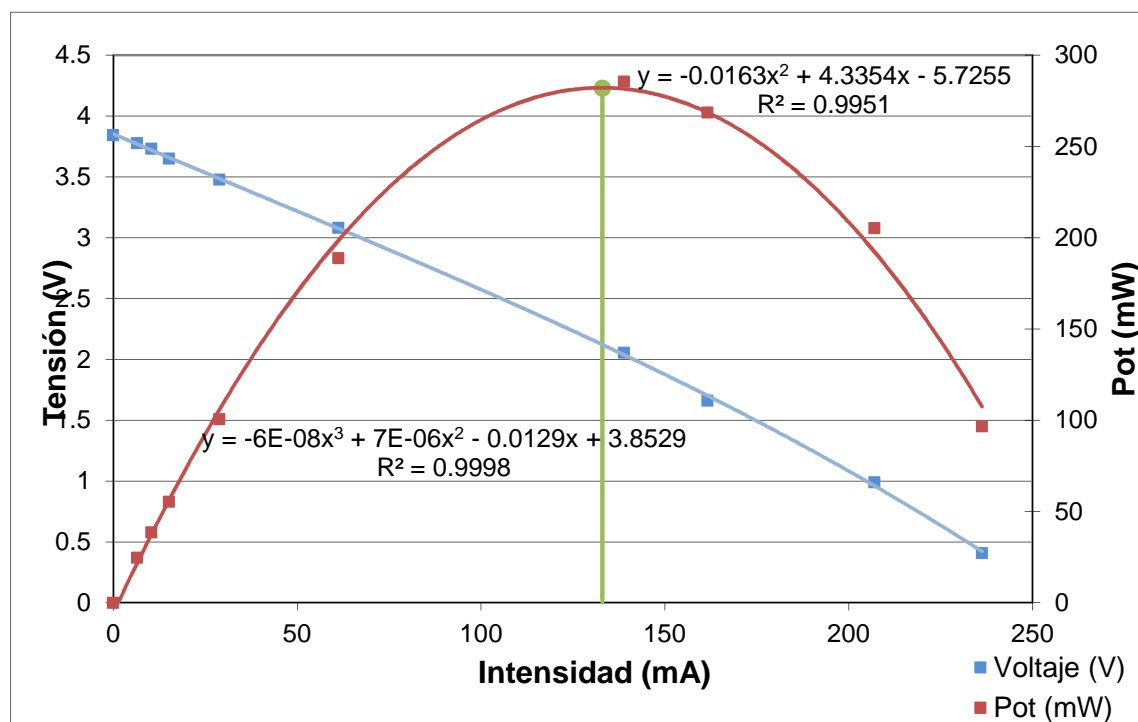


Figura 36: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador A135

Con el disipador A135, obtenemos un salto de temperaturas de 22 °C entre las caras de los módulos y genera en el óptimo 281.939 mW con un tensión de 2.12 V y 132.98 mA de corriente.

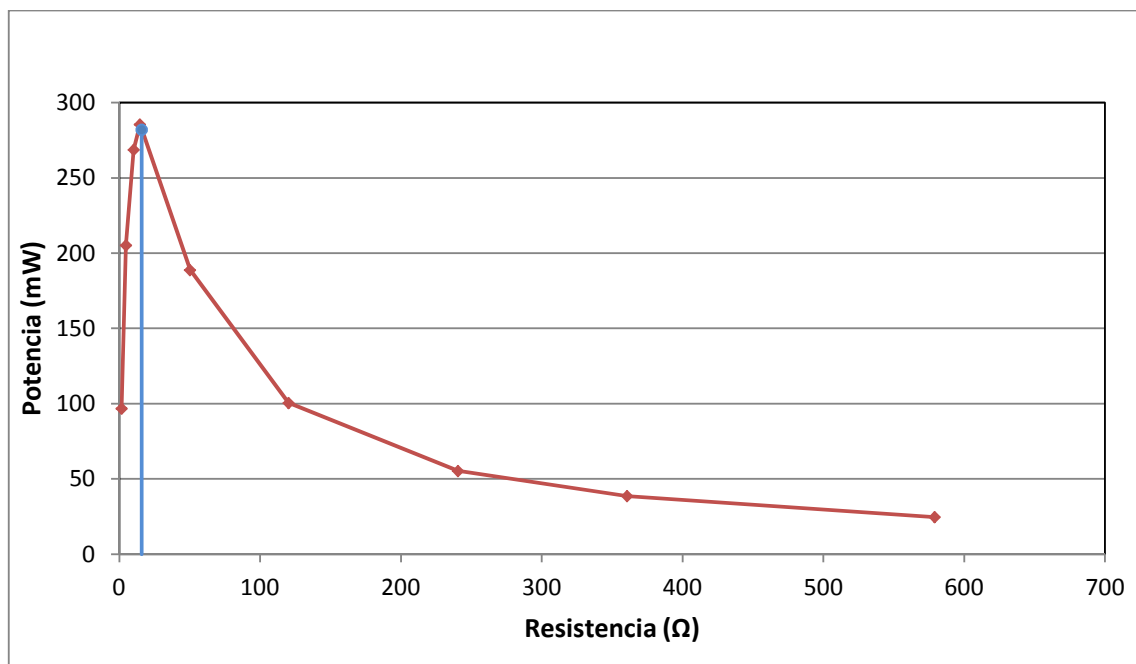
Podemos observar que respecto al disipador anterior, el K92, tenemos un salto un poco mayor, de 4 °C más, pero sin embargo conseguimos casi 160 mW más en el óptimo.

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	87	Tensión (V)	2.12	Fuente de alimentación (W)	66.447	ε (%) 0.44
T cara fría (°C)	65	Intensidad (mA)	132.98	Pérdidas de calor (W)	2.315	
Salto T (°C)	22	Pot (mW)	281.939	Calor absorbido por TEG (W)	64.132	

Cuadro 7: Resultados obtenidos con el disipador A135



Para finalizar debemos mencionar que el sistema de medida, compuesto por el aparato de medida, la sonda y el bluetooth, consume aproximadamente alrededor de 300 mW, por lo que este disipador sería el idóneo si queremos transmitir en continuo. De no ser así, con los demás disipadores, deberíamos transmitir en discontinuo, es decir, insertarle a nuestro equipo un interruptor de forma que el sistema de medida sólo se conectase cuando fuera a enviar los datos.



**Figura 37:** Curva P-R obtenida con el disipador A135

## 6.2. CONFIGURACIÓN I Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE INVIERNO

En este apartado realizaremos el mismo análisis que en el apartado anterior. Para las condiciones climáticas de invierno, ensayaremos a una temperatura ambiente de 7 °C aproximadamente y a una temperatura en la cara caliente de los módulos de 82.7 °C, calculado en el apartado 5.

### Disipador KE82

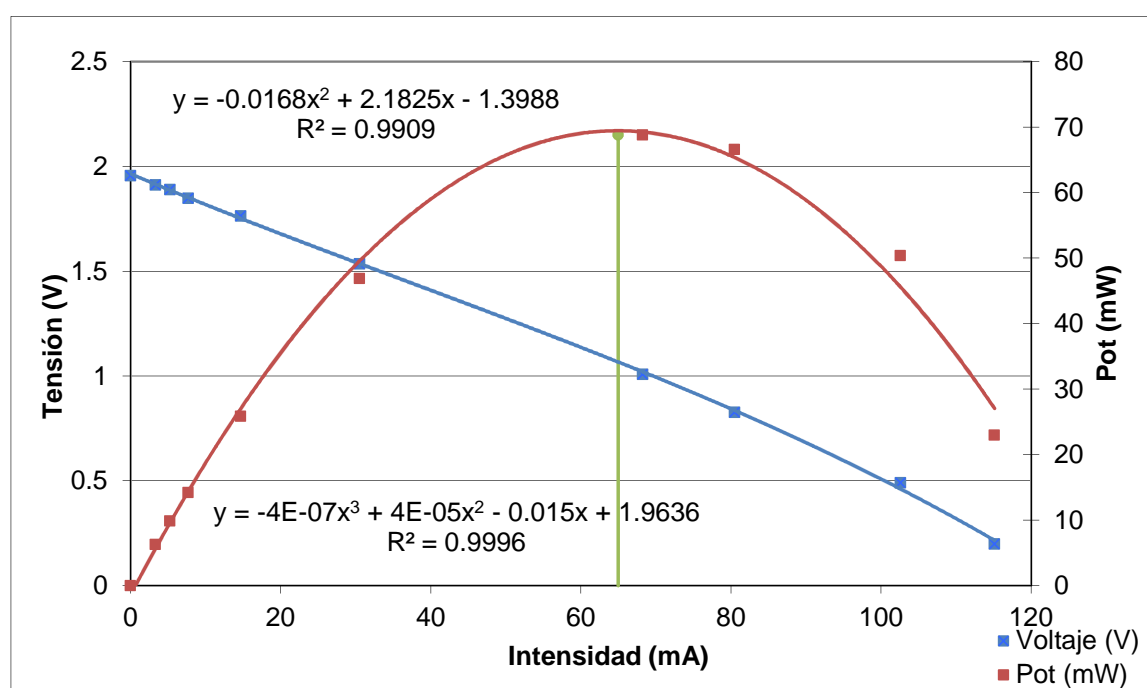


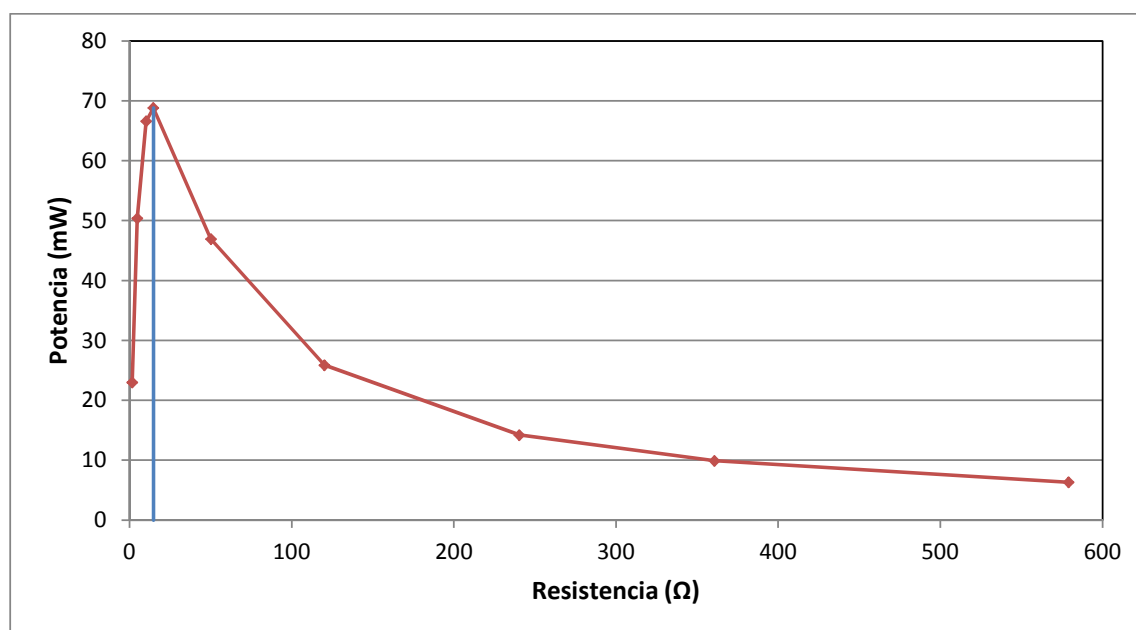
Figura 38: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador KE82

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	82.7	Tensión (V)	1.048	Fuente de alimentación (W)	42.5	
T cara fría (°C)	70.4	Intensidad (mA)	64.955	Pérdidas de calor (W)	9.564	
Salto T (°C)	12.3	Pot (mW)	68.099	Calor absorbido por TEG (W)	32.936	0.21

Cuadro 8: Resultados obtenidos con el disipador KE82

Con el disipador KE82, obtenemos un salto de 12.3 °C y en el punto óptimo, genera 68.099 mW con una tensión de 1.048 V y 64.955 mA de corriente.

Podemos mencionar, que en comparación con las condiciones climáticas de verano, tenemos un salto algo mayor y por consecuencia una generación en el óptimo también algo mayor. Esto tiene sentido pues al tener una temperatura ambiente bastante menor, el disipador puede disipar más calor, el salto de temperaturas es más alto y por consecuencia se genera más potencia.



**Figura 39:** Curva P-R obtenida con el disipador KE82

## Disipador ENERKIT

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	82.8	Tensión (V)	1.125	Fuente de alimentación (W)	43.344	ε (%) 0.20
T cara fría (°C)	69.9	Intensidad (mA)	66.632	Pérdidas de calor (W)	6.153	
Salto T (°C)	12.9	Pot (mW)	74.945	Calor absorbido por TEG (W)	37.191	

Cuadro 9: Resultados obtenidos con el disipador ENERKIT

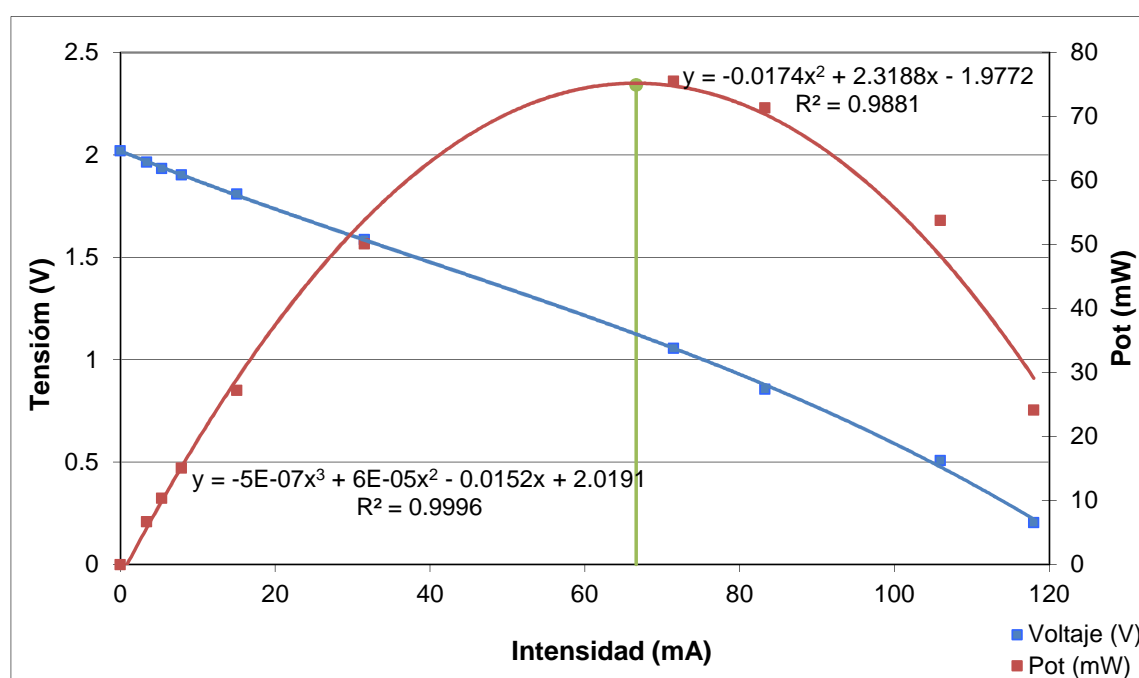
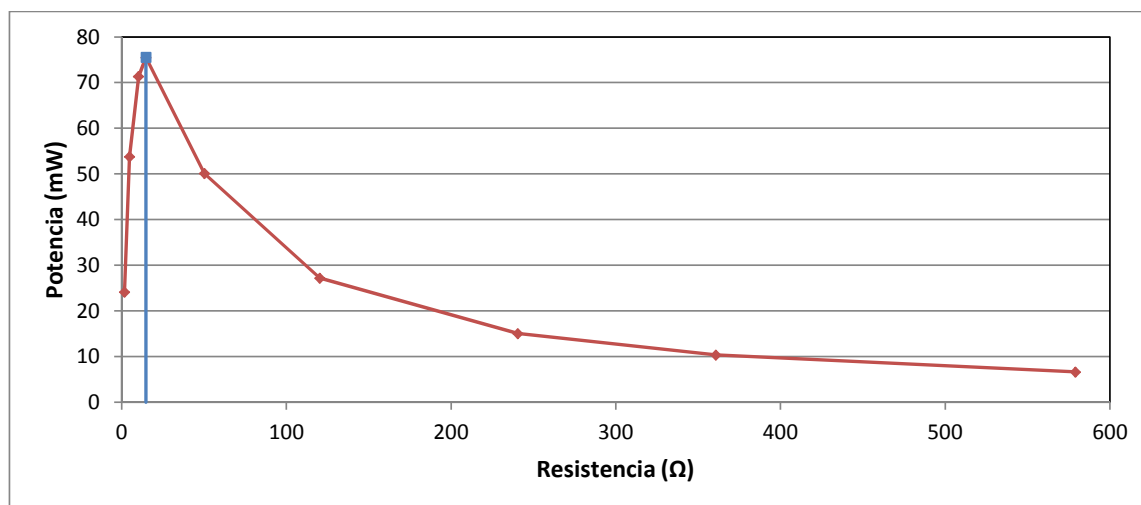


Figura 40: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador ENERKIT

Se puede observar que este disipador sigue la misma tendencia. Se obtiene un salto algo mayor y a su vez se genera más potencia que el mismo TEG en condiciones climáticas de verano.

Con un salto de 1.1 °C mayor que en las condiciones climáticas de verano, genera 15 mW más. Además podemos señalar que al ser la temperatura ambiente mucho más baja, el aislante disipa más calor.



**Figura 41:** Curva P-R obtenida con el disipador ENERKIT

### Disipador KEA82

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	82.5	Tensión (V)	1.359	Fuente de alimentación (W)	49.383	ε (%) 0.28
T cara fría (°C)	64	Intensidad (mA)	83.849	Pérdidas de calor (W)	8.163	
Salto T (°C)	18.5	Pot (mW)	114.016	Calor absorbido por TEG (W)	41.22	

**Cuadro 10:** Resultados obtenidos con el disipador KEA82

Para el TEG con el disipador KEA82 genera en el óptimo 114.016 mW, casi 30 mW más que en las condiciones climáticas de verano y tan sólo con 1.2 °C de salto mayor.

Además se puede observar que el TEG necesita más calor de la fuente de alimentación para llegar a 82 °C. Esto es lógico pues al tener una temperatura ambiente de 7 °C el disipador cede más calor y requiere de más calor para llegar a los 82 °C.

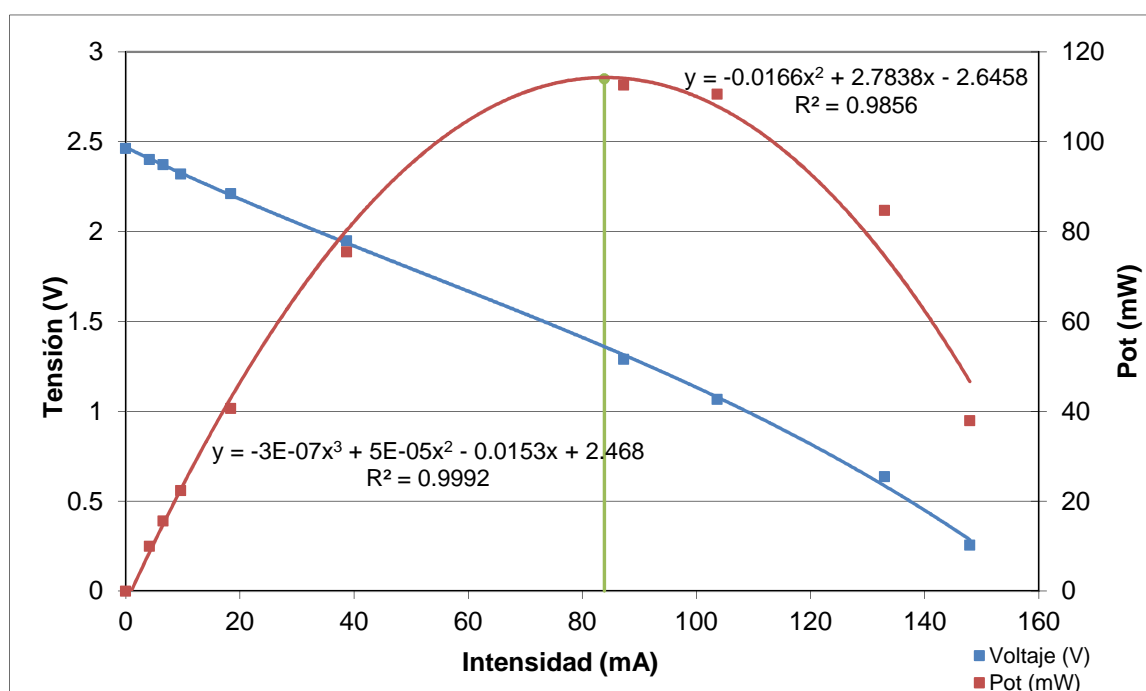


Figura 42: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador KEA82

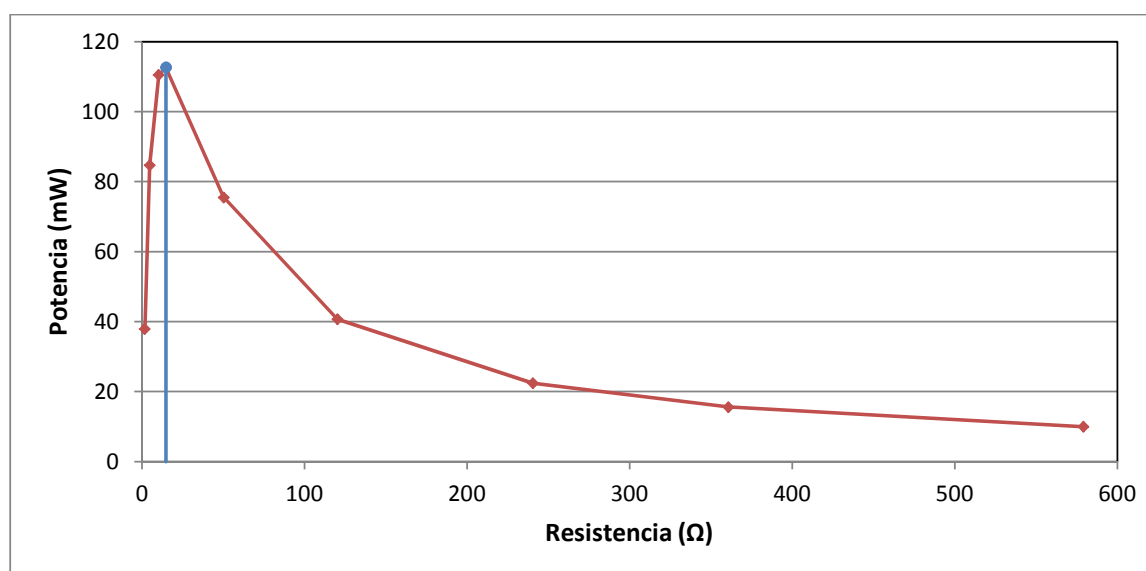


Figura 43: Curva P-R obtenida con el disipador KEA82

## Disipador K92

Podemos observar que en el punto óptimo se generan 173.05 mW, casi 60 mW más que en condiciones climáticas de verano con un salto de temperaturas de 20.5 °C.

Además, en la figura 45 se puede observar que para todos los casos el punto óptimo se alcanza para una resistencia de carga de unos 16 Ω. Como ya hemos mencionado con anterioridad, los aparatos electrónicos de baja potencia tiene una resistencia de unos 600 Ω con un consumo en nuestro caso de unos 300 mW.

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	81.7	Tensión (V)	1.689	Fuente de alimentación (W)	57.42	ε (%) 0.34
T cara fría (°C)	61.2	Intensidad (mA)	102.444	Pérdidas de calor (W)	7.006	
Salto T (°C)	20.5	Pot (mW)	173.05	Calor absorbido por TEG (W)	50.414	

Cuadro 11: Resultados obtenidos con el disipador K92

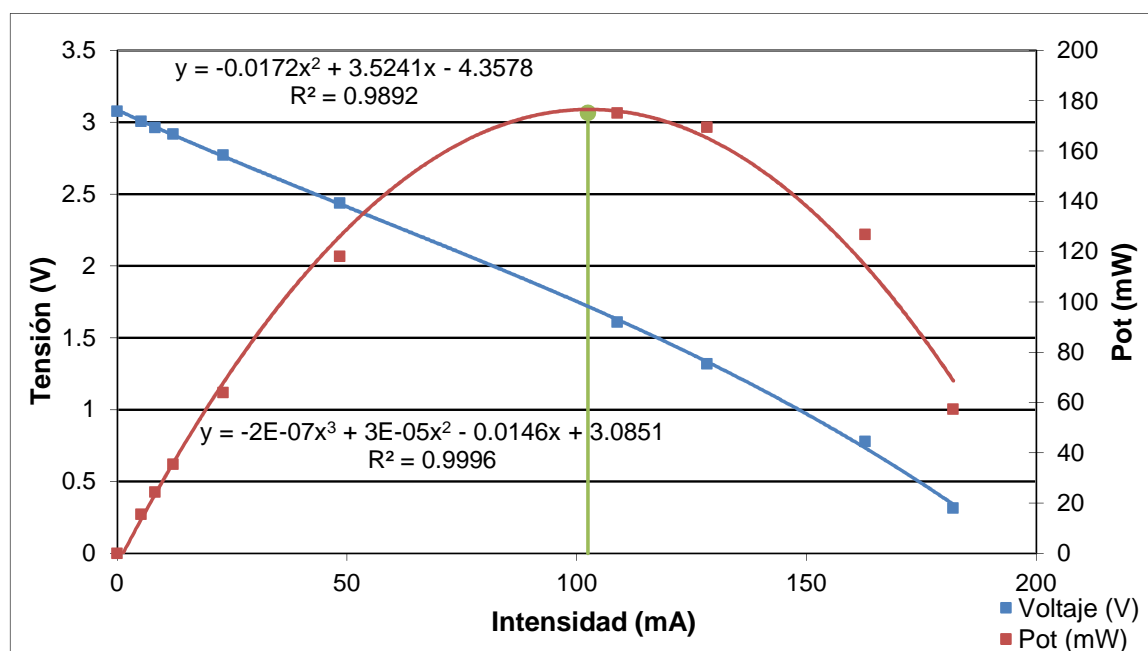
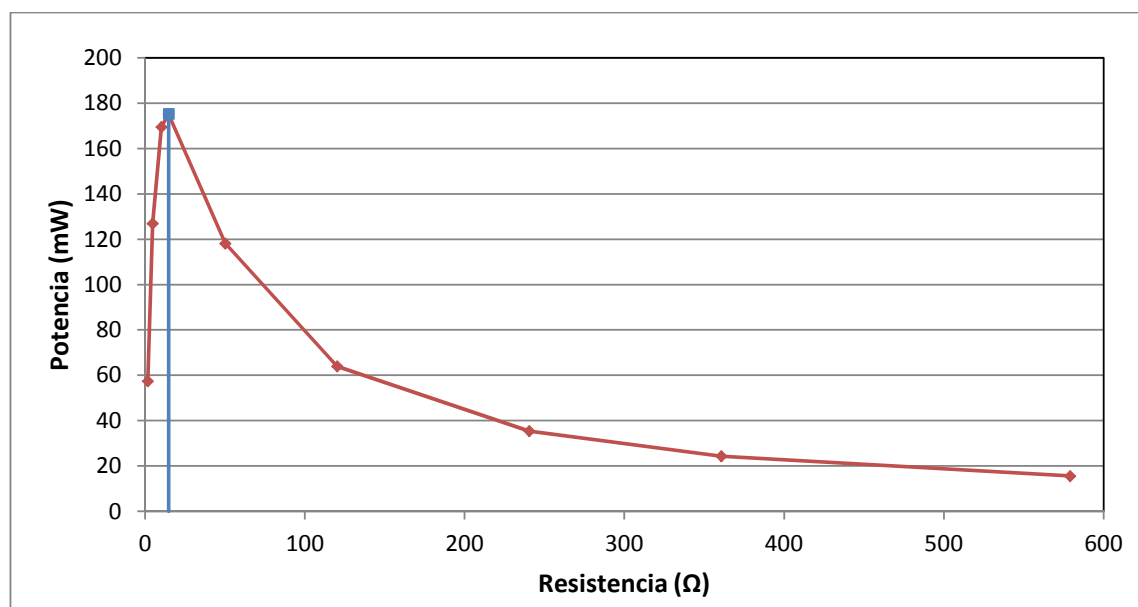


Figura 44: Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador K92

La potencia que genera el TEG viene dada por una tensión baja y una corriente muy alta. Un aparato electrónico consume unos 300 mW pero con una tensión de 4.5

V. Por estas dos razones es necesario introducir un convertidor a nuestro sistema. De esta forma conseguiremos amplificar la tensión y trabajaremos en el óptimo.



**Figura 45:** Curva P-R obtenida con el disipador K92

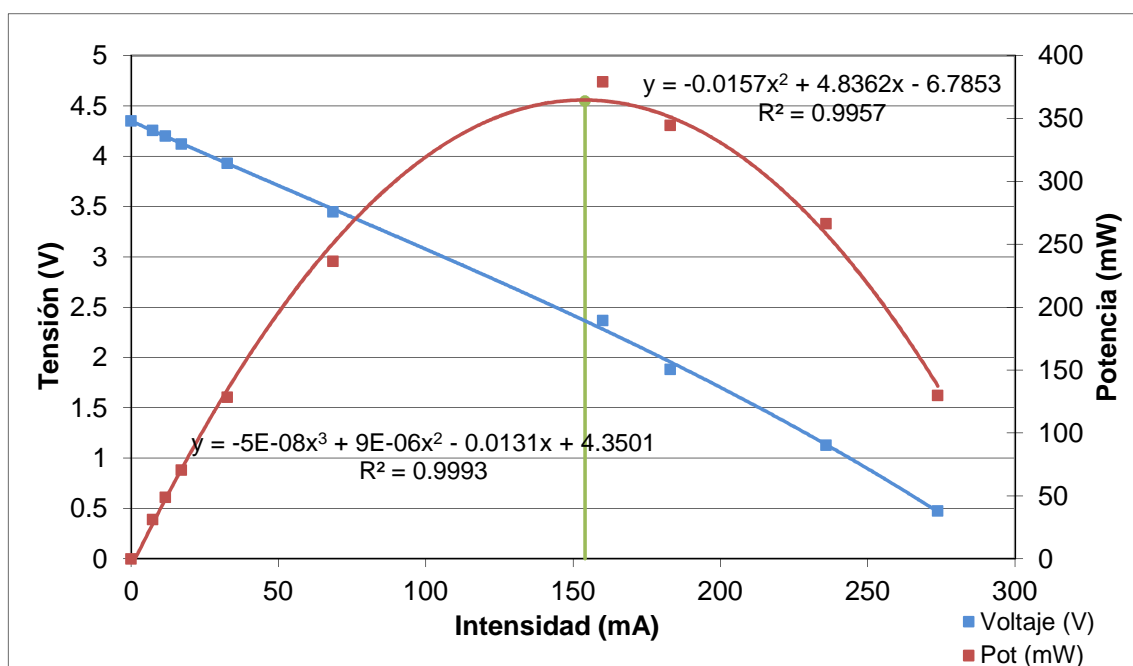
### Disipador A135

MÓDULOS PELTIER		GENERACIÓN EN EL ÓPTIMO		FLUJOS DE CALOR		EFICIENCIA
T cara caliente (°C)	82.3	Tensión (V)	2.363	Fuente de alimentación (W)	73.224	ε (%) 0.53
T cara fría (°C)	56.7	Intensidad (mA)	154.019	Pérdidas de calor (W)	5.056	
Salto T (°C)	25.6	Pot (mW)	363.988	Calor absorbido por TEG (W)	68.168	

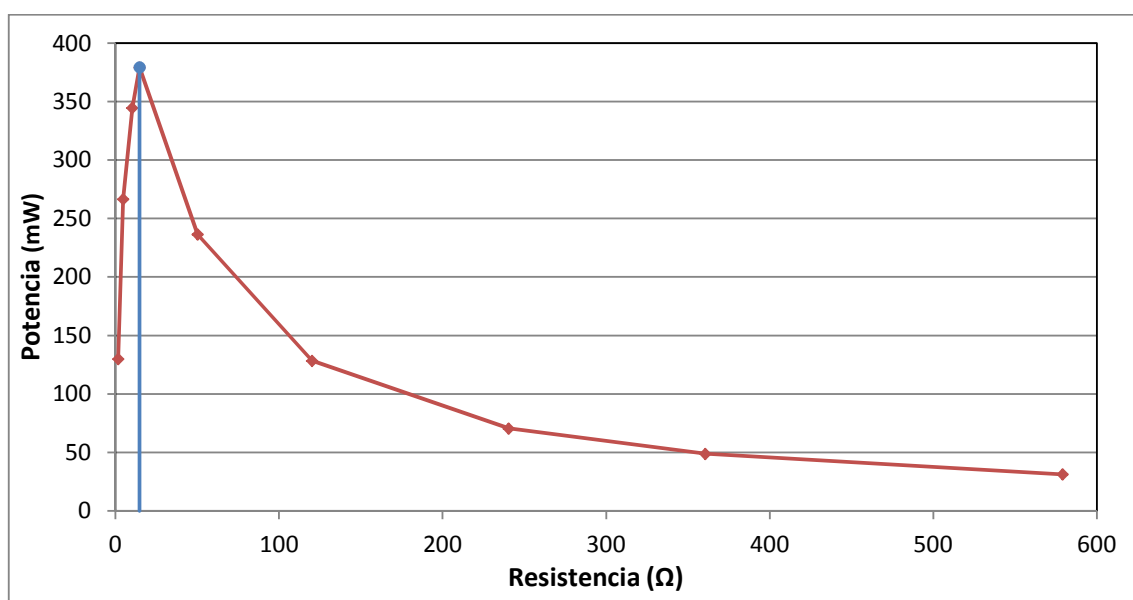
**Cuadro 12:** Resultados obtenidos con el disipador A135

Para finalizar, el disipador A135 genera en el óptimo 363.988 mW con un salto de temperaturas de 25.6 °C. Genera casi 100 mW más que en condiciones climáticas de verano y además es el disipador que más genera. En teoría, este disipador sería el idóneo para nuestro TEG, pero, debido a sus voluminosas dimensiones quizá no sea posible su instalación en la chimenea de la central de Sangüesa.





**Figura 46:** Curvas V-I, P-I obtenidas con el disipador A135

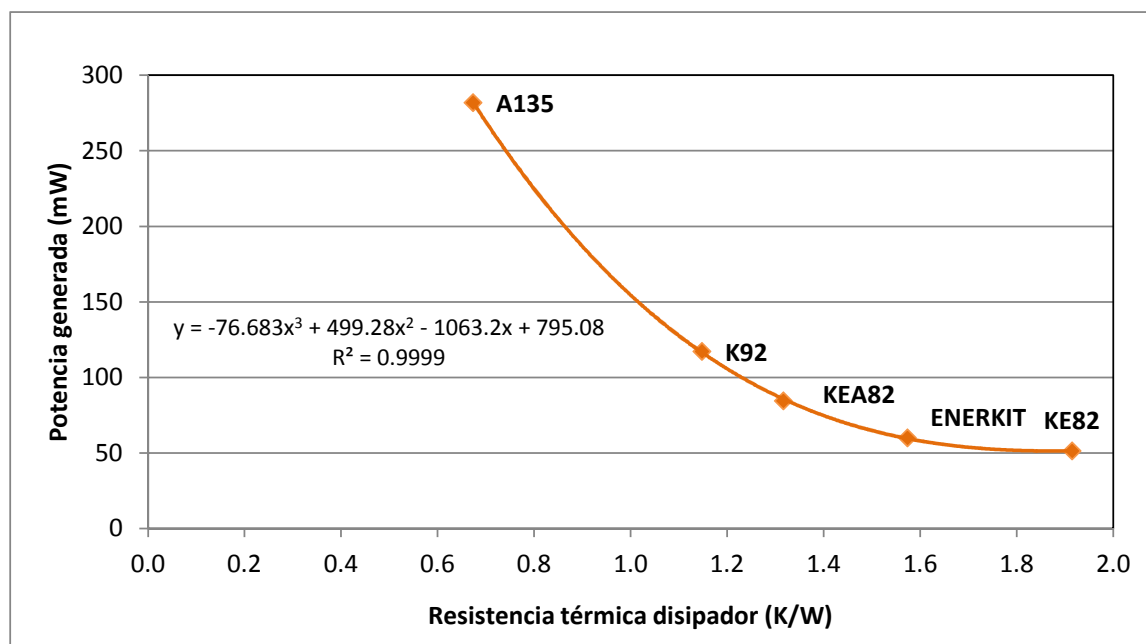


**Figura 47:** Curva P-R obtenida con el disipador A135



## 7. Estudio del punto óptimo para cada disipador analizado y en cada configuración estudiada

### 7.1. CONFIGURACIÓN I Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE VERANO



**Figura 48:** Curva de los puntos óptimos para condiciones climáticas de verano

En la tabla 13 se muestra un resumen de los ensayos realizados con cada disipador en las condiciones climáticas de verano. Además se muestra la resistencia térmica experimental calculada para cada disipador. A continuación explicaremos cómo la hemos calculado para el disipador KE82.

Como sabemos, la resistencia térmica tiene la siguiente expresión:

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q}$$

Siendo  $\Delta T$  la variación de temperaturas del disipador entre sus extremos y  $Q$  el flujo de calor que le atraviesa.

Así pues, para la  $\Delta T$  tomamos la temperatura ambiente y la temperatura de la cara fría de los módulos:

$$\Delta T = 76.4 - 18.6 = 57.8^\circ\text{C}$$

Para el flujo de calor, tendremos en cuenta las pérdidas que se producen por el aislante. Para ello tomamos un coeficiente de convección del aire de  $5 \text{ W/Km}^2$ . Además medimos el área del aislante y es  $0.121839 \text{ m}^2$ . Así pues las pérdidas por el aislante serán:

$$Q_{\text{pérdidas}} = h * A * (T_{\text{aislante}} - T_a) = 5 * 0.121839 * (30.9 - 18.6) = 7.493 \text{ W}$$

Por lo tanto el flujo de calor que llegará al disipador será el que introducimos con la fuente de alimentación menos las pérdidas por el aislante:

$$Q_{FA} - Q_{\text{pérdidas}} = 37.68 - 7.493 = 30.187 \text{ W}$$

Así pues, la resistencia térmica experimental para el disipador KE82 será:

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{57.8}{30.187} = 1.915$$

Realizamos este proceso para todos los disipadores y obtenemos los resultados mostrados en la tabla 13. Como se puede observar, el disipador con resistencia térmica más alta es el que menos salto de temperaturas obtiene entre las caras de los módulos y por consecuencia el que menos genera.

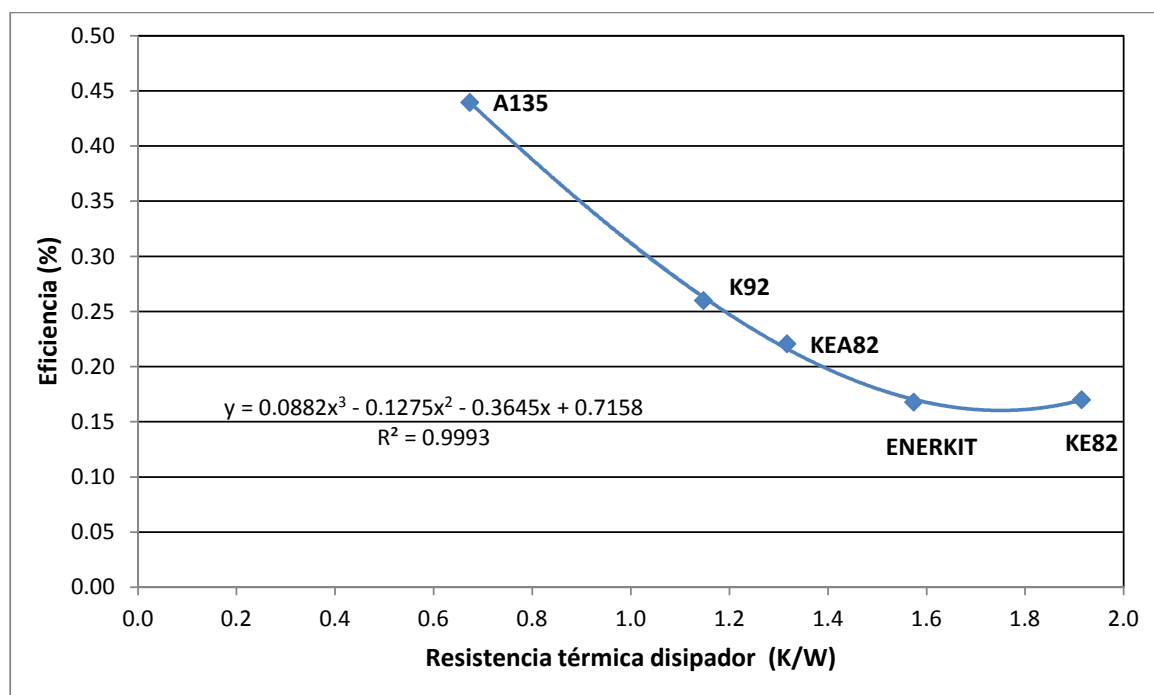
Disipador	R.térmica experimental (K/W)	Potencia generada (mW)	Salto T (°C)	T amb (°C)	T aislante (°C)
KE82	1.915	51.363	10.7	18.6	30.9
ENERKIT	1.574	60.085	11.1	20	27.5
KEA82	1.317	84.52	17.7	19.6	28.2
K92	1.148	117.309	18.2	21.6	27.2
A135	0.674	281.939	22	21.8	25.6

**Cuadro 13:** Resumen de los resultados para condiciones climáticas de verano

Además en la figura 48 se muestra la curva experimental de puntos óptimos. En ella hemos representado la potencia que cada disipador genera en el punto óptimo frente a su resistencia térmica experimental. Los puntos obtenidos los hemos aproximado a una curva de tendencia de tercer orden obteniendo una  $R^2 = 0.9999$ , es decir, la aproximación es casi perfecta.

En la figura 49 podemos observar la eficiencia de cada disipador frente a su resistencia experimental previamente calculada. Como es lógico, el disipador con menor resistencia térmica es el que tiene mayor eficiencia, pues al tener menos resistencia térmica se

obtiene mayor salto de temperaturas entre las caras de los módulos y por lo tanto el generador termoeléctrico produce más potencia.



**Figura 49:** Eficiencia de cada disipador frente a su resistencia térmica en condiciones climatológicas de verano

Los puntos se han aproximado a una curva de tendencia polinómica de tercer grado con una  $R^2 = 0.9993$ , valor muy bueno.

## 7.2. CONFIGURACIÓN I Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE INVIERNO

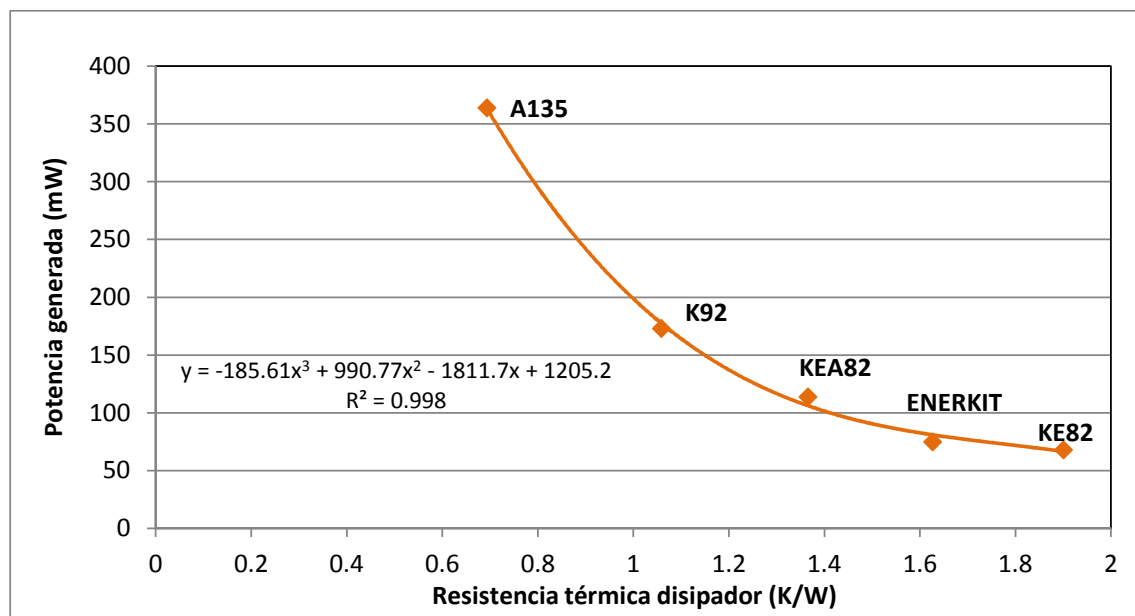
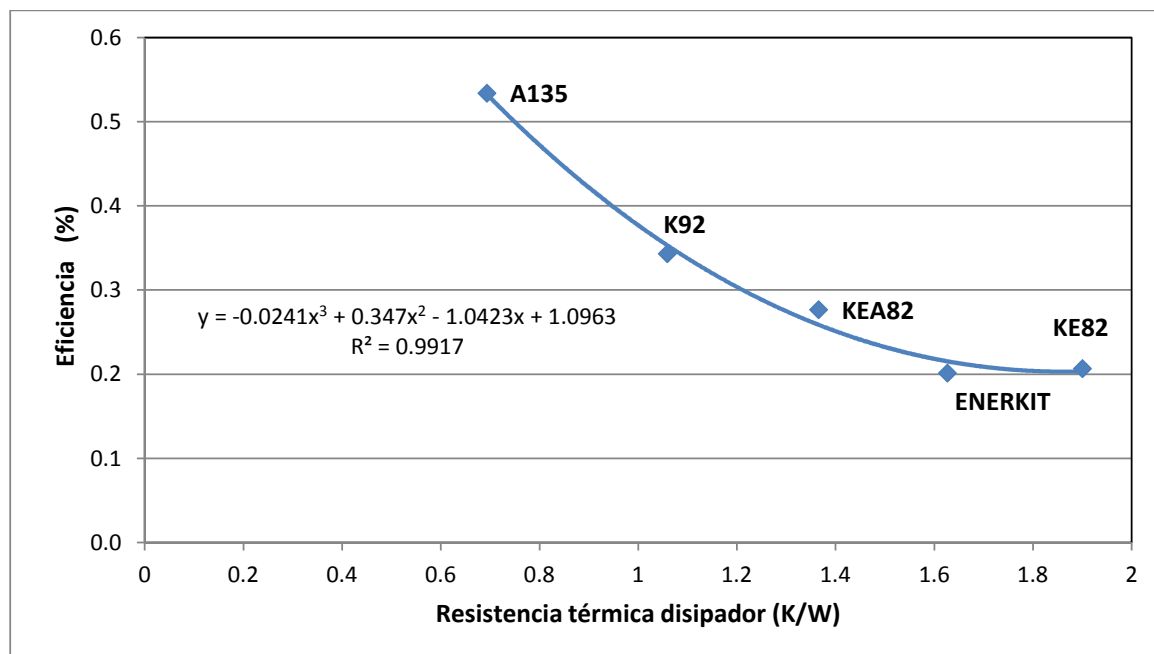


Figura 50: Curva de los puntos óptimos para condiciones climáticas de invierno

Para las condiciones climáticas de invierno realizamos el mismo proceso que en el apartado anterior. Se puede observar que las resistencias térmicas calculadas para cada disipador son bastante parecidas que en el apartado anterior. Esto es lógico pues la resistencia térmica no puede variar, es constante para cada disipador pues depende del tipo de material y de la geometría de este.

Disipador	R.térmica experimental (K/W)	Potencia generada (mW)	Salto T (°C)	T amb (°C)	T aislante (°C)
KE82	1.900	68.099	12.3	7.8	23.5
ENERKIT	1.627	74.945	12.9	9.4	19.5
KEA82	1.366	114.016	18.5	7.7	21.1
K92	1.059	173.05	20.5	7.8	19.3
A135	0.694	363.987	25.6	9.4	17.7

Cuadro 14: Resumen de los resultados para condiciones climáticas de invierno



**Figura 51:** Eficiencia de cada disipador frente a su resistencia térmica en condiciones climatológicas de invierno

Como en el subapartado anterior, la figura 51 muestra la eficiencia de cada disipador frente a su resistencia experimental. La curva es muy parecida a su homóloga en condiciones climatológicas de verano, variando un poco pues al tener diferente temperatura ambiente se disipa más calor por el aislante y el generador produce más potencia por lo que las eficiencias para cada disipador son algo mayores.

Para finalizar, podemos concluir que la elección del disipador es clave pues la generación termoelectrica va directamente ligada a él. Así pues, a priori el disipador óptimo sería el A135 pues genera unos 300 mW. Decidiremos más adelante, tras realizar un análisis de la potencia consumida por el aparato de medida, qué disipador elegimos.



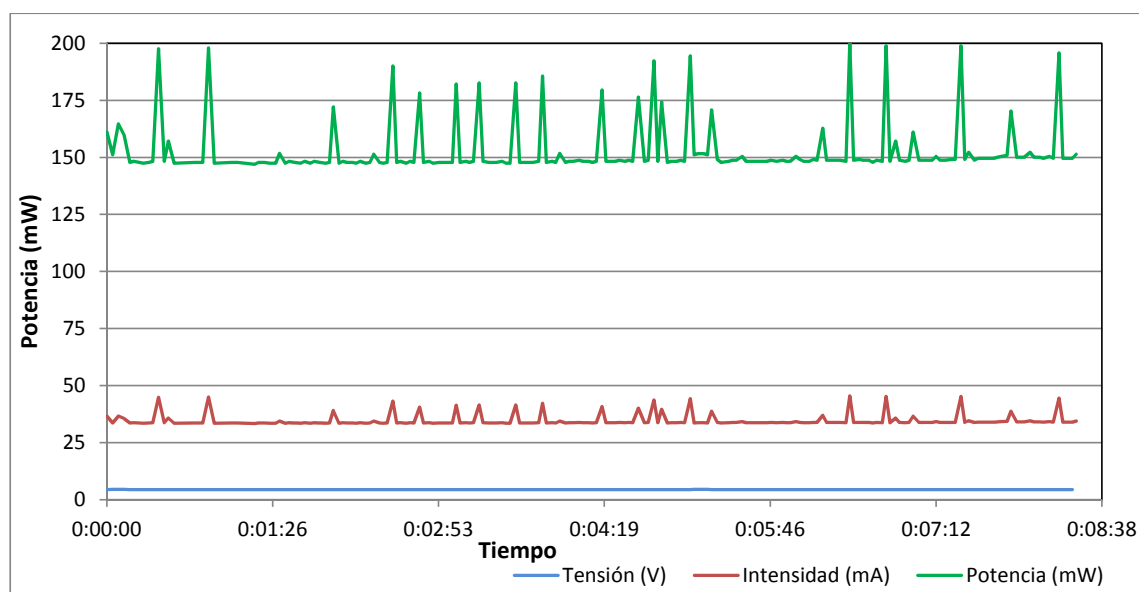


## 8. Cálculo de la potencia consumida por la sonda y el aparato de medida

### 8.1. ESTUDIO DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL APARATO DE MEDIDA

Para nuestro estudio, necesitamos saber cuánta potencia consume nuestro aparato de medida. Para ello, utilizamos dos aparatos de medida, uno de corriente y otro de tensión que conectados a través de dos sondas al adquisidor de datos, éste registra los valores y los muestra por pantalla mediante el programa AMR-Control Data.

Así pues, para un primer estudio del consumo del aparato de medida, nos valemos de una fuente de alimentación, que simulará nuestro generador termoeléctrico. Inicialmente, el aparato de medida está construido para ser alimentado por 3 pilas de 1.5 V. Sin embargo, nosotros lo conectamos a la fuente de alimentación a partir de los cables de salida del dispositivo.



**Figura 52:** Consumo del aparato de medida sin emitir

Como se observa en la figura 52, el aparato de medida consume unos 150 mW con una tensión casi constante de 4.4 V y una corriente de unos 33 mA. Debemos mencionar que se producen unos picos de corriente, que a su vez producen unos picos de potencia. Esto picos de corriente pueden ser debidos a muchas causas. Debemos remarcar que estamos utilizando un aparato de medida diseñado para ser alimentado con pilas, y

lo alimentamos con una fuente de alimentación, que normalmente da una tensión e intensidad constantes pero puede que varíe un poco.

Aún así, teniendo en cuenta los picos, realizamos una media de la corriente, tensión y potencia con todos los valores registrados y obtenemos un consumo medio de:

- $V = 4.4 \text{ V}$
- $I = 34.7 \text{ mA}$
- $P = 152.8 \text{ mW}$

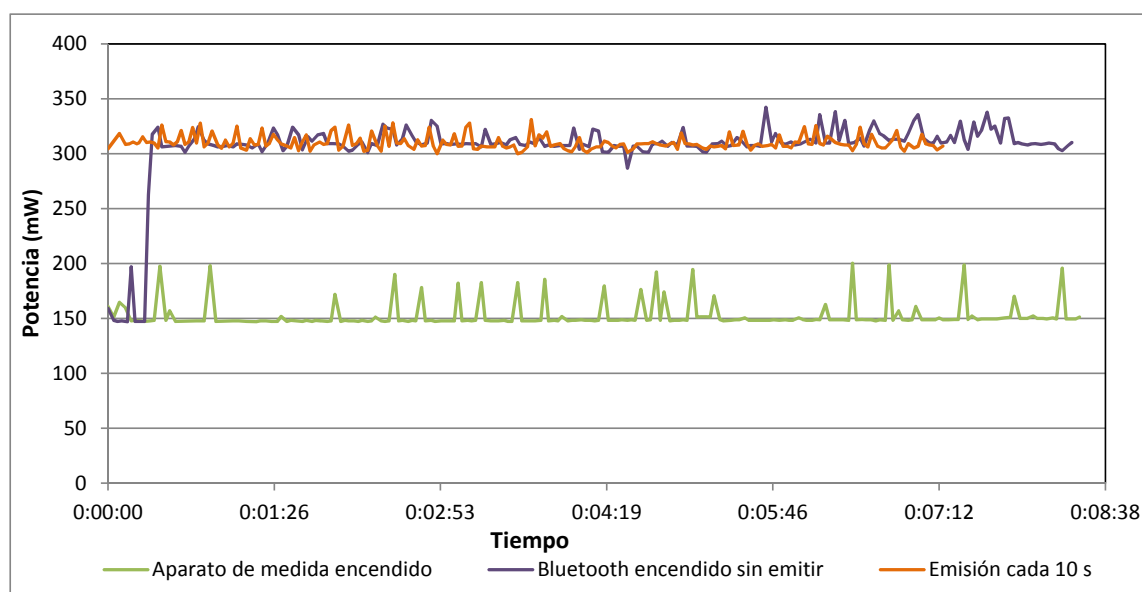
Nuestro generador termoeléctrico, para condiciones climáticas de invierno, tanto con el disipador A135 como con el K92, es capaz de suministrar energía suficiente para que nuestra sonda sea autónoma y pueda recoger datos en continuo. Sin embargo, para condiciones climáticas de verano, con el disipador K92, no llegamos a 150 mW, pues genera 117. Más adelante, decidiremos si es conveniente que la sonda autónoma adquiera datos en continuo, o si sería más que óptimo un control de la temperatura en discontinuo, es decir, recogiendo datos cada cierto tiempo.

## 8.2. ESTUDIO DE LA POTENCIA CONSUMIDA A TRAVÉS DE UNA TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA BLUETOOTH

En este segundo subapartado analizaremos el consumo que tiene este aparato de medida con la transmisión de los valores de temperatura mediante un sistema bluetooth. Hay que tener en cuenta que nuestra sonda autónoma está instalada en una chimenea a una cierta altura. Así pues, necesitamos obligatoriamente enviar los datos registrados por la sonda autónoma al centro de control de la central de biomasa, pues no sería cómodo tener que subir a la chimenea para saber el valor que está registrando la sonda.

Así pues, realizamos el mismo proceso que en el apartado anterior. Conectamos el aparato de medida a una fuente de alimentación y a su vez, mediante bluetooth, conectamos el aparato de medida a un ordenador. A través del programa AMR- Control Data, el aparato de medida envía los datos que registra cada cierto tiempo que le indiquemos.

En el gráfico 53, mostramos tres curvas. La curva verde corresponde al apartado anterior. Se trata del consumo del aparato de medida encendido, tomando valores de temperatura, pero sin emitirlos vía bluetooth.



**Figura 53:** Resumen del consumo del aparato de medida en los diferentes casos

La curva de color violeta, representa el consumo del aparato de medida tomando datos y con el bluetooth conectado al ordenador, pero sin emitir datos al ordenador.

Hicimos este ensayo para saber si el consumo al emitir los datos cada cierto tiempo era significativo o no.

Por último, la curva de color naranja representa el consumo del aparato de medida emitiendo datos al ordenador cada 10 segundos.

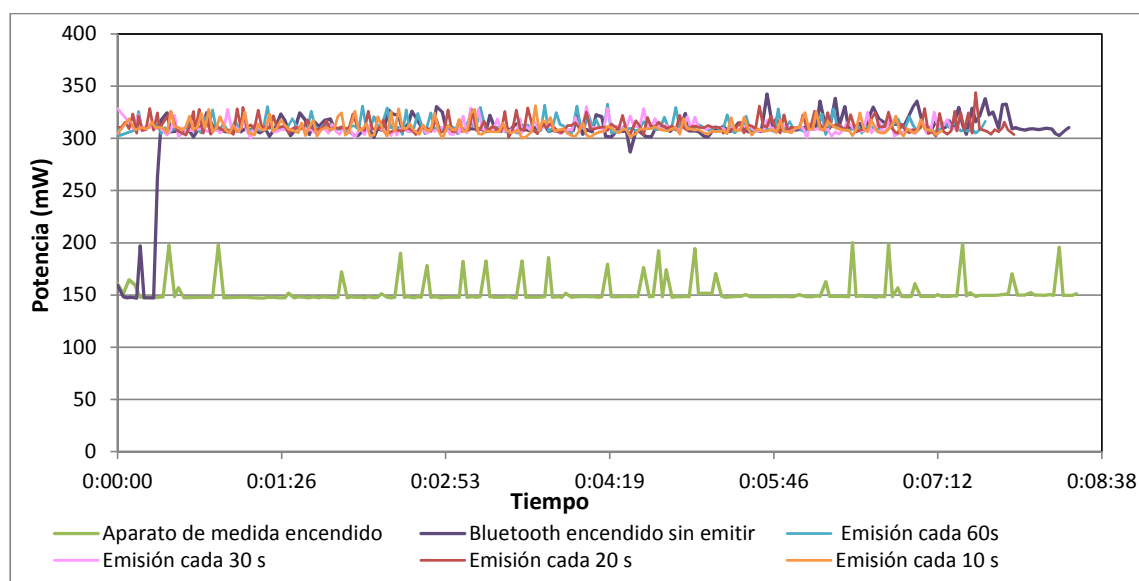
Como se puede apreciar, el consumo de mantener el bluetooth conectado pero sin emitir los datos y el consumo al emitirlos al ordenador son casi idénticos, por lo que parece que la emisión de datos tiene un consumo despreciable, lo que hace duplicar el consumo de potencia del aparato de medida es conectar el bluetooth.

Para asegurarnos, hemos realizado varios ensayos modificando el tiempo de emisión. Hemos emitido los datos vía bluetooth cada 10,20,30 y 60 s y como se muestra en la figura 54, el consumo al variar los tiempos de emisión apenas aumenta. Como conclusión, podemos afirmar que la emisión de datos tiene un consumo despreciable respecto al consumo que genera realizar la conexión vía bluetooth entre el aparato de medida y un ordenador.

Así, realizamos una media con todos los datos registrados. El consumo del aparato de medida emitiendo datos vía bluetooth será:

- $V = 4.4 \text{ V}$
- $I = 69.21 \text{ mA}$
- $P = 304.68 \text{ mW}$

Con este consumo de potencia, el único generador termoelectrico capaz de suministrar dicha cantidad de potencia para trabajar en continuo sería el estudiado con el disipador A135. Todos los demás disipadores no llegan a generar 305 mW, por lo que la única opción óptima sería trabajar en discontinuo, es decir, que el aparato de medida emitiera datos cada cierto tiempo y mientras tanto estuviese apagado, para que el convertidor fuese capaz de almacenar energía mediante las pilas.



**Figura 54:** Consumo del aparato de medida para diferentes tiempos de emisión

## 9. Diseño definitivo de un dispositivo funcional de generación termoeléctrica para su instalación en la chimenea de la central térmica de biomasa de Sangüesa

En este apartado vamos a describir el diseño definitivo de la sonda autónoma para su instalación en la chimenea de la central térmica de Sangüesa. Como ya hemos descrito anteriormente, se realizó el análisis de 5 disipadores diferentes. La elección del disipador la vamos a realizar teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Potencia generada por el generador termoeléctrico con dicho disipador.
- Consumo del aparato de medida.
- Aspectos constructivos.

En cuanto a la **potencia generada** del TEG con cada disipador, el que más produce es el A135 con una generación de 282 mW para condiciones climáticas de verano y 364 mW en invierno. El siguiente disipador con el cual se genera más potencia es el K92 con 117 mW en verano y 173 mW en condiciones climáticas invernales.

Sobre el **consumo del aparato de medida**, como ya se ha analizado en el apartado 8, la sonda autónoma consume unos 305 mW emitiendo datos en continuo vía bluetooth a un ordenador. Si el aparato de medida no emitiera datos, su consumo sería de 153 mW. Este parámetro es esencial a la hora del diseño final del modelo, pues deberemos decidir si necesitamos que la sonda esté registrando datos continuamente o es suficiente con que controle la temperatura cada cierto tiempo.

Por último, en cuanto a los **aspectos constructivos**, también debemos tener en cuenta la geometría y forma del disipador. Debemos ser conscientes, de que el generador termoeléctrico va a ser instalado a una cierta altura, en una chimenea, por lo que no deberá ser muy pesado o voluminoso. El disipador A135, tiene una altura de 135 mm y una base de  $125 \times 925 \text{ mm}^2$ , llegando a ser muy pesado y bastante voluminoso. Sin embargo, el disipador K92 tiene una altura de 60.5 mm y una base de  $92 \times 92 \text{ mm}^2$ , siendo una geometría óptima para los módulos utilizados.

Así pues, teniendo en cuenta estos tres aspectos se ha decidido **instalar el generador termoeléctrico con el disipador K92 y controlar la temperatura de la chimenea cada cierto tiempo**, ya que con la potencia que generamos no llegamos a emitir en continuo.

Esta última decisión parece lógica ya que, tampoco es necesario tener controlada la temperatura de los humos de la chimenea cada segundo, pues es un parámetro que no varía en exceso. Por lo tanto, con un control de la misma cada 3 o 5 minutos, tendremos un registro preciso y a su vez el convertidor doble-boost será capaz de almacenar la energía necesaria para que la sonda registre la temperatura y envíe el dato vía bluetooth.

En el cuadro 15, mostramos los resultados obtenidos con el disipador K92 a modo de resumen y en el cuadro 16 los consumos del aparato de medida. A partir de estos datos, se realizará una valoración de la situación y se procederá a un análisis más exhaustivo de la idea de transmitir los datos en discontinuo.

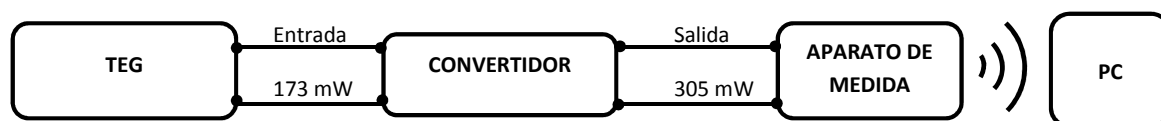
K92	Condiciones invernales	Condiciones estivales
T cara caliente(°C)	81.7	88.1
T cara fría(°C)	61.2	69.9
SALTO T (°C)	20.5	18.2
Pot generada (mW)	173.05	117.309

**Cuadro 15:** Resumen de los resultados obtenidos con el disipador K92

CONSUMO APARATO DE MEDIDA	Potencia (mW)
Emitiendo datos vía bluetooth	304.68
Sin emitir datos	152.8

**Cuadro 16:** Resumen de los consumos del aparato de medida

A partir de estos datos, y con el equipo funcionando en condiciones climatológicas de invierno, se procedió a la conexión del aparato de medida al convertidor DC/DC, y a su vez éste al generador termoeléctrico, con el fin de comprobar cuánto tiempo pudiera estar funcionando. En la figura 55, se muestra un esquema simplificado del banco de ensayos. Así pues, como el aparato de medida envía vía bluetooth los datos de la sonda a un ordenador, en cuanto deje de emitir, sabremos que la salida del convertidor es menor de 4,5 V, por lo que las pilas se habrán descargado y no podrán suministrar los 305 mW requeridos.



**Figura 55:** Esquema simplificado del banco de ensayos

En este primer ensayo, no se introdujo ningún control de la intensidad y tensión de entrada y salida pues como el convertidor no tiene un sistema de seguridad para los sobrepicos, queremos evitar cualquier posible riesgo. La información que el aparato de medida envía vía bluetooth al ordenador se muestra en la figura 56. El programa AMR-Control v5 permite exportar los datos a pdf directamente.

```
// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// G00
S2
DATE:      19.03.13
17:59:45 00: +0023.0 °C NiCr suelo ext
18:00:45 00: +0022.9 °C NiCr suelo ext
18:01:45 00: +0022.9 °C NiCr suelo ext
18:02:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:03:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:04:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:05:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:06:45 00: +0022.9 °C NiCr suelo ext
18:07:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:08:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:09:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:10:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:11:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:12:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:13:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:14:45 00: +0022.9 °C NiCr suelo ext
18:15:45 00: +0022.8 °C NiCr suelo ext
18:16:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:17:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:18:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:19:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:20:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:21:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:22:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:23:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:24:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:25:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:26:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:27:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:28:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:29:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:30:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:31:45 00: +0022.4 °C NiCr suelo ext
18:32:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:33:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:34:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:35:45 00: +0022.6 °C NiCr suelo ext
18:36:45 00: +0022.7 °C NiCr suelo ext
18:37:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:38:45 00: +0022.4 °C NiCr suelo ext
18:39:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext
18:40:45 00: +0022.5 °C NiCr suelo ext

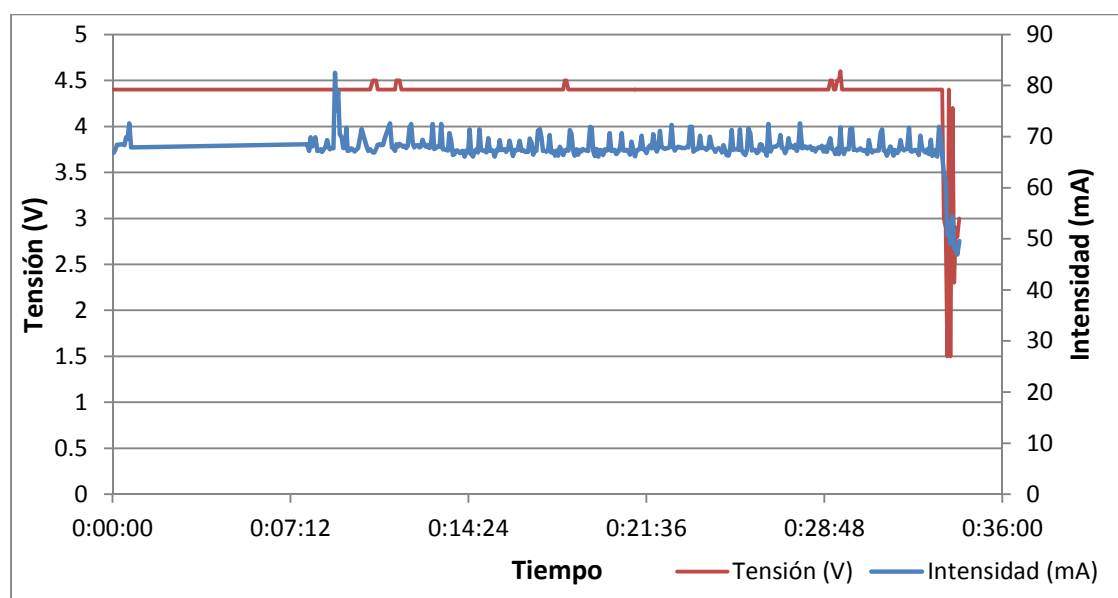
// * Direct connection COM4: Disconnected: B9600 ( Xon/Xoff)
```

**Figura 56:** Envío de datos del aparato de medida al ordenador

El aparato de medida comenzó a emitir sobre las 18:00 pm y su última medida la envió a las 18:40 pm, es decir, el convertidor doble-boost consiguió que el aparato de

medida funcionase emitiendo durante 40 min. Esto se debe a que al convertidor llegan 175 mW y el aparato de medida consume 305 mW emitiendo. Las 3 pilas al estar cargadas consiguen que el aparato de medida funcione por un cierto tiempo pero en cuanto no consiguen almacenar la energía suficiente para darle al aparato de medida dicha cantidad de energía, éste se apaga.

El siguiente ensayo a realizar, fue repetir el ensayo anterior pero esta vez controlando la tensión y corriente de salida del convertidor doble-boost. Una vez cargadas de nuevo las pilas, y gracias a un controlador de tensión y corriente que se conecta directamente al adquisidor de datos, controlamos la tensión y corriente de salida mientras el aparato de medida tomaba el dato de la temperatura y emitía vía bluetooth. Los resultados se muestran en la figura 57.



**Figura 57:** Control de la tensión y corriente del aparato de medida emitiendo

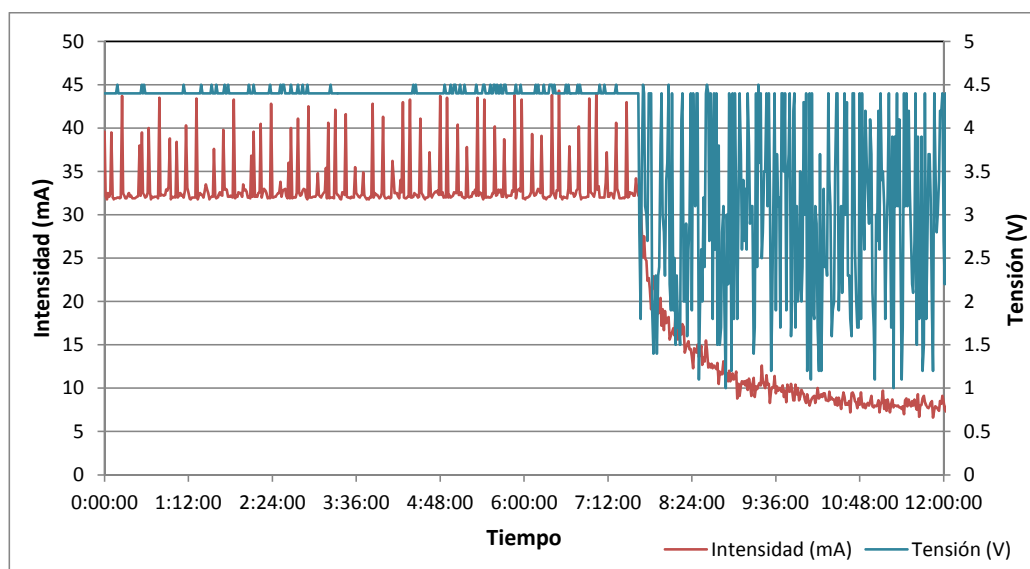
Como se puede observar, la tensión y corriente se mantienen en un cierto valor y caen en picado justo cuando el convertidor no puede suministrarle la energía necesaria. En este caso, para el minuto 33 la tensión cae. Puede ser debido a que las pilas en el ensayo anterior estuvieran un poco más cargadas y por eso haya durado varios minutos más.

Otro factor importante a remarcar es que una vez que las pilas se descargan, el generador termoeléctrico es incapaz de cargarlas. En diversos aparatos electrónicos, si la fuente de alimentación, ya sea directamente la red o un generador, no es capaz



de suministrarle la energía que requieren para funcionar, mediante un control interno, no permiten que pase corriente a modo de no consumir una energía que no va a ser aprovechada. En este caso, el aparato de medida no tiene este tipo de control interno, pues una vez descargadas las pilas se midió la intensidad que circulaba por el aparato de medida y no era nula.

Por lo tanto, al seguir cediendo energía al aparato de medida las baterías son incapaces de cargarse aunque el generador le suministre también energía. Este hecho se comprobó dejando toda una noche el TEG conectado al convertidor y éste al aparato de medida y las pilas no se cargaron.



**Figura 58:** Control del aparato de medida sin transmitir datos vía bluetooth

Otro análisis que se ha realizado es comprobar cuánto dura el aparato de medida tomando el valor de la temperatura pero sin transmitir datos. En teoría, para condiciones invernales, el TEG genera suficiente potencia como para alimentar al aparato de medida sin transmisión de los datos adquiridos. Sin embargo a la hora de realizar el análisis, se midió la tensión de entrada al convertidor y en vez de ser 1.6 V, que es la tensión que tiene el TEG en el punto óptimo, era 1.2 V.

Así pues, se conectó el TEG al convertidor y éste al aparato de medida. En la gráfica 58 se muestran los resultados de tensión y corriente que alimentan al aparato de medida.

Como se puede observar, el conjunto funciona durante aproximadamente 8 horas con una tensión de 4.4 V y una corriente de 33 mA con diversos picos que ya se explicaron su origen anteriormente. A partir de la octava hora la tensión comienza a fluctuar y la corriente tiende a descender.

Como conclusión final, se puede afirmar que el conjunto formado por el generador termoelectrico, convertidor doble-boost y aparato de medida no es autónomo en continuo ni transmitiendo datos ni sin transmitir. La única **opción viable y mas lógica es trabajar en discontinuo**, es decir, emitir los datos cada cierto tiempo y mientras tanto tener el aparato de medida desconectado del convertidor para que las pilas sean capaces de almacenar la energía suficiente.

De esta forma, se optará por **introducir un interruptor electrónico** de manera que el aparato de medida sólo esté conectado cuando deseemos controlar la temperatura. Como ya se dijo anteriormente, con un control de la temperatura de los humos de la chimenea cada 5 minutos, o incluso más tiempo, es suficiente.

Los controladores electrónicos que existen hoy en día en el mercado te permiten modelar el tiempo de desconexión, es decir, el tiempo que el aparato de medida estaría apagado, así como el tiempo de encendido. De esta forma mientras no circulara corriente por el aparato de medida, las pilas serían capaces de cargarse gracias al generador termoelectrico y para el siguiente punto de medida tendrían la suficiente energía para transmitírsela al aparato de medida.

Como por el momento no se dispone de un interruptor electrónico, lo haremos manual. Es decir, mantendremos el aparato de medida desconectado un cierto tiempo para que las pilas puedan almacenar energía, y a continuación, lo conectaremos durante otro período de tiempo, de forma que el aparato de medida sea capaz de registrar la temperatura y enviarla vía bluetooth.

Para ello, también se debe mencionar el procedimiento de conexión que tiene el bluetooth. Una vez que conectas el aparato de medida al ordenador, el dispositivo queda emparejado al ordenador, es decir, queda guardado como un dispositivo de conexión usual.

Así pues, cada vez que el aparato de medida esté encendido deberemos abrir el AMR-Control 5.14, presionar el botón *Connect* que conecta directamente el ordenador al aparato de medida. A continuación deberemos entrar en la pestaña *Devices* y presionar *List*. En esa pantalla, se muestran todos los dispositivos que el AMR Control encuentra. Seleccionaremos el nuestro y presionaremos en *Device Programming*. En esta nueva pestaña puedes modular cada cuanto queremos que el aparato de medida envíe datos

al ordenador y más opciones. Así pues, decidiremos cada cuánto queremos los datos.

A continuación y para terminar, entramos en *Terminal* y aparecerá una nueva ventana. Presionamos el botón *Start* y los datos comenzarán a aparecer por pantalla.

En la figura 59, se muestra la energía que entra y sale del convertidor doble-boost. Recordemos que el convertidor tiene 3 pilas que almacenan energía, por lo que si el aparato de medida no está conectado a este, las pilas deberían ser capaces de cargarse. Así pues, vamos a calcular en cuánto tiempo las pilas tendrían la suficiente energía almacenada para alimentar al aparato de medida. Sería el simple cociente entre 305 mW y 173 mW. El resultado es 1.763 s. Es decir, si tenemos desconectado durante 1.763 segundos el aparato de medida del convertidor, éste sería capaz de aportar los 305 mW que éste necesita.



**Figura 59:** Entrada y salida del convertidor doble-boost

Como ya se ha comentado anteriormente, no necesitamos emitir los datos que adquiere el aparato de medida con mucha brevedad. Con un control de la misma cada 5 minutos será suficiente.

El proceso será el siguiente. Se conectará el aparato de medida al convertidor, conectaremos el bluetooth y transmitiremos el dato de la temperatura. A continuación desconectaremos el aparato de medida del convertidor durante 5 minutos y volveremos a realizar el mismo proceso.

Este ensayo se realizó durante 3 horas aproximadamente y el aparato de medida emitió los datos sin ningún problema. En la tabla 60 se muestran varias tomas de medidas realizadas durante este ensayo. No se han incluido todas pues ocuparía demasiado espacio. Como se observa, el aparato de medida transfirió los datos de temperatura aproximadamente cada 5 min. Hay que tener en cuenta que la conexión y desconexión la realizamos manualmente.

En el programa AMR 5.19 se moduló para que cada 5 minutos el aparato de medida emitiese 3 tomas de medida con el fin de tener un control más fiable, por eso en la tabla 60 se pueden ver 3 medidas de temperatura cada 5 minutos.

Así pues, **queda demostrado que el sistema generador termoeléctrico, convertidor doble-boost y aparato de medida son óptimos trabajando en discontinuo**. Se debe mencionar que se ha realizado el ensayo con el aparato de medida desconectado cada 5 minutos, pero según la teoría con 1.763 segundos sería suficiente, por lo que se podría emitir los datos vía bluetooth cada períodos de tiempo más cortos si se necesita un control de la temperatura más preciso.

```

// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// G00
S2
DATE:          26.03.13
18:24:00 00: +0022.8 °C CoCo
18:24:05 00: +0022.8 °C CoCo
18:24:10 00: +0022.8 °C CoCo
X

// * Direct connection COM4: Disconnected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// G00
S2
DATE:          26.03.13
18:28:18 00: +0022.3 °C CoCo
18:28:23 00: +0022.3 °C CoCo
18:28:28 00: +0022.3 °C CoCo
X

// * Direct connection COM4: Disconnected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// G00
S2
DATE:          26.03.13
18:32:12 00: +0022.1 °C CoCo
18:32:17 00: +0022.1 °C CoCo
18:32:22 00: +0022.1 °C CoCo
X

// * Direct connection COM4: Disconnected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// G00
S2
DATE:          26.03.13
18:36:43 00: +0021.9 °C CoCo
18:36:48 00: +0021.9 °C CoCo
18:36:53 00: +0021.9 °C CoCo
X

// * Direct connection COM4: Disconnected: B9600 ( Xon/Xoff) *

// * Direct connection COM4: Connected: B9600 ( Xon/Xoff) *

```

**Figura 60:** Emisión de datos al ordenador cada 5 minutos



## 10. Estudio de la viabilidad económica del modelo desarrollado

En este estudio vamos a analizar la rentabilidad de instalar un generador termo-eléctrico que alimente al aparato de medida en lugar de una batería que dicho aparato llevaría por defecto. Así pues, suponemos unas condiciones de trabajo. El aparato de medida se encenderá cada 5 minutos y estará encendido 2 minutos para que nos de tiempo a conectar el bluetooth y transferir el dato registrado al ordenador. Es decir, el aparato estará encendido 16 minutos cada hora.

Además debemos conocer el consumo de la batería. Tomando una batería MN1203 de 4,5 V con 5400 mAh, obtenemos que es capaz de almacenar 24300 mWh. Como conocemos el consumo del aparato de medida con el bluetooth conectado, 305 mW, la fracción de estos dos datos nos da el tiempo que tardan las pilas en consumir la energía que almacenan.

$$5400 \text{ mAh} * 4.5 \text{ V} = 24300 \text{ mWh}$$

$$\frac{24300 \text{ mWh}}{305 \text{ mW}} = 79.7 \text{ h}$$

Es decir, cada 80 horas la batería se descargará y deberá ser reemplazada por otra para poder seguir controlando la temperatura. Esta tarea de reemplazarla y recargarla de nuevo la deberá realizar el personal de mantenimiento. Para ello, suponemos que un técnico de mantenimiento cobra 10 € por hora y le cuesta una media hora realizar el cambio de pilas. Si el aparato de medida se conecta 2 minutos cada 5 minutos, estará conectado 16 minutos cada hora. Veamos cada cuánto tiempo deberá ser reemplazada:

$$16 \frac{\text{min}}{\text{hora}} * 24 \frac{\text{hora}}{\text{día}} = 384 \frac{\text{min}}{\text{día}} = 6.4 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$$

$$\frac{76.7 \text{ horas}}{6.4 \frac{\text{horas}}{\text{día}}} = 12.5 \text{ días}$$

Por lo tanto, cada 12 días y medio un operario deberá subir a la chimenea, realizar el cambio de batería y poner la descargada a cargar, para así tenerla ya cargada. El ahorro en euros cada año de esta operación será:

$$\frac{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}{12.5 \frac{\text{días}}{\text{cambio}}} = 29.2 \frac{\text{cambios}}{\text{año}}$$

$$10 \frac{\text{€}}{h} * 0.5 \frac{h}{\text{cambio}} * 30 \frac{\text{cambios}}{\text{año}} = 150 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Es decir, al año nos ahorraríamos 150€ en cambiar la batería del aparato de medida.

Ahora bien, vamos a analizar todos los costes que supondría instalar el aparato de medida y realizaremos un análisis de los flujos de caja con el fin de calcular el VAN, el *TIR* y el *Pay-back*. Así pues, enumeramos los costes asociados al generador termoelectrico:

- Disiapor= 20 €
- Módulos termoelectricos= 60 €
- Taco= 20 €
- Convertidor doble-boost= 50 €
- Aparato de medida= 200€
- Sonda= 25 €
- Coste instalación del equipo= 30 €
- TOTAL= 405 €

Todos estos costes serán nuestra inversión inicial y la deberemos amortizar. Para ello suponemos que nuestro equipo tendrá una vida útil de 10 años y procedemos a el cálculo de los flujos de caja que se muestran en la tabla 17.

Además debajo de la misma se ha calculado el VAN, el *TIR* y el *Pay-back* con los que a continuación, analizaremos la viabilidad económica de nuestro proyecto.

En la tabla 17, se muestran los flujos de caja para cada año. Se puede observar que en el Año 1 nuestro flujo de caja neto es algo mayor. Esto es debido a que hemos tenido en cuenta el ahorro del coste de las 2 baterías recargables que se usaría en el aparato de medida. En realidad el aparato de medida utiliza 1 batería, pero necesitamos otra para realizar el cambio instantáneo y así mientras una está funcionando en el aparato,



la otra será recargada y estará lista para su uso cuando se descargue la inicial. Hemos tomado como valor de la batería 4.5 € cada una.

Además, se observa que en el Año 5 nuestro flujo de caja es algo menor. Esto es debido a las pilas que el convertidor doble-boost lleva instaladas. Si suponemos una vida útil de dichas pilas de unos 5 años (previsión un tanto pesimista), para el Año 5 las deberemos cambiar. Así pues tendremos en cuenta el coste de las pilas, unos 1,33 € cada una, y el coste del operario que deba cambiarlas, unos 5 €, si suponemos que cobra 10€ la hora y le cuesta hacer el cambio una media hora.

Ahora bien procedemos a analizar los resultados. Comenzamos definiendo los 3 parámetros calculados:

El valor actual neto, **VAN**, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

El método de valor presente es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado.

- Si  $VAN > 0$ : La inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida, es decir, el proyecto podrá aceptarse.
- Si  $VAN < 0$ : La inversión produciría pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida, es decir, el proyecto deberá ser rechazado.

La **TIR** (Tasa Interna de Retorno) mide la tasa de descuento o rendimiento de un proyecto de inversión que a través de los flujos de caja futuros netos hace que el VAN, sea igual a cero. Es decir, nos muestra cuál es el tipo de interés para el cual el proyecto de inversión no genera beneficios ni pérdidas.

- Si  $TIR > i$ : Se aceptará el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida
- Si  $TIR < i$ : Se rechazará el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad menor que la rentabilidad mínima requerida

El **Pay-back**, es uno de los llamados métodos de selección estáticos. Se trata de una técnica que tienen las empresas para hacerse una idea aproximada del tiempo que tardarán en recuperar el desembolso inicial invertido en el proceso productivo.

Así pues, tenemos un VAN mayor que cero, una TIR mayor que el interés, que es del 3 %, y un Pay-back de 3 años y 5 meses, por lo que podemos deducir y afirmar que la **viabilidad económica de nuestro proyecto es óptima**.

Además, no hemos tenido en cuenta los beneficios a nivel medioambiental y de desarrollo. Estamos utilizando un calor que se desaprovecha y mediante él generamos electricidad para alimentar a una sonda que llega a ser completamente autónoma.

Para finalizar, debemos también mencionar que el análisis se ha realizado para un sólo aparato de medida. Con el generador termoeléctrico, la sonda podría instalarse en zonas de difícil acceso y pudiendo instalar más de una, por lo que resultaría mucho más ventajoso.

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Inversión	405										
Ingresos		159	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Coste mantenimiento						9					
Amortización		(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)	(40.5)
BAIT=BAI		118.5	109.5	109.5	109.5	100.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5
Impuesto de sociedades (30%)		(35.55)	(32.85)	(32.85)	(32.85)	(30.15)	(32.85)	(32.85)	(32.85)	(32.85)	(32.85)
Beneficio Neto		82.95	76.65	76.65	76.65	70.35	76.65	76.65	76.65	76.65	76.65
Desamortización		40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5
Flujo de caja neto	(405)	123.45	117.15	117.15	117.15	110.85	117.15	117.15	117.15	117.15	117.15

Cuadro 17: Estudio de los flujos de caja

$$VAN = -2355 + \frac{123.45}{1.03} + \frac{117.15}{1.03^2} + \frac{117.15}{1.03^3} + \frac{117.15}{1.03^4} + \frac{110.85}{1.03^5} + \frac{117.15}{1.03^6} + \frac{117.15}{1.03^7} + \frac{117.15}{1.03^8} + \frac{117.15}{1.03^9} + \frac{117.15}{1.03^{10}} = 595 \text{ €}$$

$$TIR = 26 \%$$

$$\text{Pay-back} = 3 \text{ años y 5 meses}$$

$$i = 3 \%$$



## 11. Conclusiones

En primer lugar, hemos **localizado y analizado los posibles emplazamientos de nuestra sonda**. Tras el estudio, hemos llegado a la conclusión de que el emplazamiento óptimo será en la pared exterior de la chimenea.

Una posible línea de futuro será analizar la colocación del generador termoeléctrico en la pared interna de la chimenea, obteniendo un mayor salto de temperaturas entre las caras de los módulos, y así una mayor generación de electricidad.

Tras realizar los cálculos pertinentes, **obtuvimos las temperaturas de la cara caliente de los módulos para las condiciones climatológicas invernales y estivales** que se tendrían en la chimenea si colocásemos el generador termoeléctrico. Así pues, con estas temperaturas realizamos los ensayos experimentales, a fin de tener en el laboratorio una simulación lo más parecida posible a las condiciones de la chimenea de la central de biomasa de Sangüesa.

Además, tras el estudio de las **curvas experimentales V-I, P-I y P-R** con diversos disipadores, llegamos a la conclusión de que el generador termoeléctrico más óptimo para instalarlo en la central de biomasa de Sangüesa, sería con el disipador K92.

No es el disipador que más potencia genera pero, por motivos constructivos desechamos el disipador con más generación. El generador termoeléctrico con el disipador K92 obtiene unas eficiencias energéticas para las condiciones climatológicas estivales e invernales, de 0.26 % y 0.34 % respectivamente. Se tratan de unas eficiencias un tanto bajas, pero es lógico pues estamos reutilizando un calor residual y obteniendo saltos de temperaturas entre las caras de los módulos pequeños.

Por otra parte, hemos estudiado el consumo del aparato de medida. La conclusión a la que llegamos ha sido que el aparato de medida consume lo mismo emitiendo a cualquier período. Es decir, consume lo mismo si emite cada 10 segundos que cada 1 minuto.

Esto es un gran punto a favor pues podremos emitir cada el cierto tiempo que queramos sin preocuparnos de que la potencia consumida por el aparato de medida aumente.

Uno de los puntos importantes ha sido que hemos llegado a la conclusión de que **la sonda puede ser autónoma** si emitimos los datos registrados cada un período de tiempo mayor de 1,57 segundos. Se deberá introducir un interruptor electrónico que

controle este proceso.

Para finalizar, hemos realizado el estudio económico del proyecto. Gracias a los indicadores *VAN*, *TIR* y *Pay-back* hemos llegado a la conclusión de que el proyecto es **totalmente viable económicamente**.

## Nomenclatura

$\alpha$	Coeficiente Seebeck	$\mu V/K$
$\dot{Q}$	Potencia calorífica	$W$
$\dot{W}$	Potencia	$W$
$\kappa$	Conductividad térmica	$W/mK$
$\rho$	Resistividad eléctrica	$\Omega * m$
$\sigma$	Coeficiente Thomsom	$V/K$
$\xi$	Eficiencia	
$A$	Área	$m^2$
$C$	Capacidad térmica	$J/K$
$c_p$	Calor específico a presión constante	$J/kg * K$
$I$	Intensidad de corriente eléctrica	$A$
$J$	Densidad de corriente eléctrica	$A/m^2$
$K$	Conductividad térmica	$W/mK$
$L$	Longitud	$m$
$m$	Masa	$kg$
$N$	Número de pares semiconductores	
$P$	Potencia generada	$W$
$P$	Presión	$Pa$
$Q$	Calor	$J$
$R$	Resistencia térmica	$K/W$
$R_{elec}$	Resistencia eléctrica de un módulo Peltier	$\Omega$
$S$	Superficie	$m^2$
$T$	Temperatura absoluta	$K$
$Z$	Figura de mérito de los materiales semiconductores	$K^{-1}$





## Bibliografía

- [1] Srinivas Garimella Alexander S. Rattner.  
**Energy harvesting, reuse and upgrade to reduce primary energy usage in the USA.**  
*ELSEVIER*, 2011.  
<http://www.elsevier.com/locate/energy>.
- [2] David Reay Richard Law, Adam Harvey.  
**Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry.**  
2010.
- [3] James P. Blanchard Zhenqiang Ma Thomas A. Carstens, Michael L. Corradini.  
**Thermoelectric Powered Wireless Sensors for Spent Fuel Monitoring.**  
*IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, 2012.
- [4] Andrés E. Sotelo Mieg. Santiago Tornos Tejedor.  
**Termoelectricidad, la energía del desequilibrio.**  
*Técnica Industrial*, 2006.  
<http://www.scopus.com>.
- [5] **New record for turning heat into power**, 2012.  
<http://www.abc.net.au/science/articles/2012/09/20/3594573.htm>.
- [6] Jesús Biel Gayé.  
***Formalismo y métodos de la Termodinámica.***  
Editorial Reverté, 1998.
- [7] David Astráin.  
**Introducción a la Termoelectricidad.**  
2009.  
<http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion>.
- [8] D.M Rowe.  
***Handbook of thermoelectrics***, pages 9–14, 214–219.  
CRC Press, 1995.
- [9] **Frequently Asked Questions About Our Power Generation Technology.**  
<http://www.tellurex.com/pdf/seebeck-faq>.
- [10] L. Wu J. Chen, Z. Yan.  
***Influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator.***  
*J. Appl. Phys*, 1996.

- [11] M. H. Cobble.  
**Analysis of a Thermoelectric Device Having Contact Resistance.**  
In *XIth International Conference on Thermoelectrics*, 1992.
- [12] N. T. Burak J.E. Sunderland.  
***Influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric power generator***, pages 465–471.  
Pergamon Press, 1964.
- [13] Agencia Estatal de Meteorología.  
<http://www.meteo.navarra.es/climatologia/fichasclimaticas>.

# Anexos

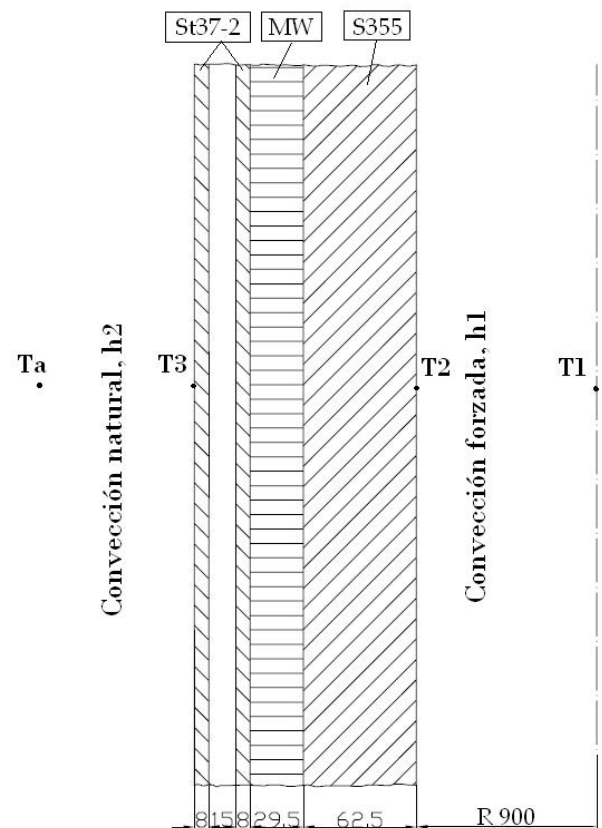
## A. Cálculo de las temperaturas en la chimenea de la central térmica de Sangüesa

### CONDICIONES CLIMÁTICAS PARA UN PERÍODO INVERNAL

Basándonos en las fichas que la Agencia Estatal de Meteorología realiza de las diferentes estaciones climáticas, realizamos una media de las temperaturas medias en los meses invernales y obtenemos una temperatura ambiente de  $7^{\circ}\text{C}$  para la estación climatológica de Javier, la más cercana a la localidad de Sangüesa. [13]

Así pues, procederemos al cálculo de los coeficientes de convección  $h_1$  y  $h_2$  para el posterior cálculo de la temperatura  $T_3$ .

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}, k_1 = 54 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}, k_2 = 0.04 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}, k_3 = 50 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}, k_4 = 0.0262 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}, k_5 = 50 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^{\circ}\text{C},$   
 $v = 14 \text{ m/s}, L = 49.7\text{m}$
- $T_a = 7^{\circ}\text{C}$



**Figura 61:** Sección de la chimenea

El coeficiente global de transmisión de calor será:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{e_5}{k_5} + \frac{1}{h_2} \quad (52)$$

Convección forzada:

Las expresiones para convección forzada en el interior de tubos es:

$$|T_1 - T_2| < 60^\circ C \quad (53)$$

$$0.6 \geq Pr \geq 60 \quad (54)$$

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (55)$$

$$n = 0.3 \leftrightarrow T_2 < T_1 \quad (56)$$

$$n = 0.2 \leftrightarrow T_2 > T_1 \quad (57)$$

Así pues suponemos  $|T_1 - T_2| < 60^\circ C$ . Tomamos las propiedades del aire para la temperatura media  $T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{140 + 7}{2} = 73.5^\circ C$ :

- $Pr = 0.697737$
- $\nu = 20.49736 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.02983$

$$Re_D = \frac{v * D_2}{\nu} = \frac{14 * 1.8}{20.49736 * 10^{-6}} = 1.229426 * 10^6$$

$$Nu = 0.023 * (1.229426 * 10^6)^{0.8} * 0.697737^{0.3} = 1536.73$$

$$Nu = \frac{h_1 * D_2}{\kappa}$$

$$1536.73 = \frac{h_1 * 1.8}{0.02983}$$

$$h_1 = 25.467 W/Km^2$$

### Convección natural:

Las expresiones para convección natural en el exterior de tubos son:

$$Gr_l = \frac{9.81 * L^3 * |T_s - T_3| * \alpha}{\nu^2} \quad (58)$$

Si  $D > \frac{35 * L}{Gr^{0.25}}$ , entonces podemos considerar el tubo como una placa plana y utilizar sus expresiones.

$$Ra = Gr * Pr \quad (59)$$

$$Nu = 0.1 * Ra^{1/3} \quad (60)$$

Suponemos temperatura  $T_3 = 27^\circ C$  y entramos en tabla para obtener las propiedades del aire a esa temperatura:

- $Pr = 0.708$
- $\nu = 16.84 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.0262$
- $\alpha = 0.2216 * 10^{-4}$

$$Gr_l = \frac{9.81 * 49.7^3 * |140 - 27| * 0.2216 * 10^{-4}}{(16.84 * 10^{-6})^2} = 1.06341 * 10^{13}$$

$$\frac{35 * 47.9}{(1.06341 * 10^{13})^{0.25}} = 0.963 \rightarrow 2.046 > 0.963 \rightarrow$$

Consideramos placa plana

$$Ra = 1.06341 * 10^{13} * 0.708 = 7.5289 * 10^{12} \rightarrow$$

Régimen turbulento

$$Nu = 0.1 * (7.5289 * 10^{12})^{1/3} = 1959.95$$

$$1959.95 = \frac{h_2 * 49.7}{0.0262}$$

$$h_2 = 1.03321 W/Km^2$$

Comprobación  $T_3$ :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.467} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + 2 * \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{0.0262} + \frac{1}{1.03321}$$

$$U = 0.43132 W/Km^2$$

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T'_3 - T_a)$$

$$0.43132 * (140 - 7) = 1.03321 * (T'_3 - 7)$$

$$T'_3 = 62.52^\circ C = 335.6 K$$

Obtenemos las siguientes propiedades para  $T'_3 = 62.52^\circ C = 335.6 K$  :

- $Pr = 0.7003$
- $\nu = 19.584 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.02886$
- $\alpha = 0.2753 * 10^{-4}$

$$Gr_l = \frac{9.81 * 49.7^3 * |140 - 62.52| * 0.2753 * 10^{-4}}{(19.584 * 10^{-6})^2} = 6.7056 * 10^{12}$$

$$Ra = 6.7056 * 10^{12} * 0.7003 = 4.696 * 10^{12} \rightarrow$$

Régimen turbulento

$$Nu = 0.1 * (4.696 * 10^{12})^{1/3} = 1674.59$$

$$1674.59 = \frac{h'_2 * 49.7}{0.02886}$$

$$\boxed{h'_2 = 0.9724 W/Km^2}$$

Volvemos a comprobar  $T_3$ :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.467} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + 2\frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{0.0262} + \frac{1}{0.9724}$$

$$U = 0.42034 W/Km^2$$

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_a) = h'_2 * A_3 * (T_3'' - T_a)$$

$$0.42034 * (140 - 7) = 0.9724 * (T_3' - 7)$$

$$T_3'' = 64.49^\circ C$$

La temperatura  $T_3$  supuesta era de  $62.52^\circ C$ . Suponemos que el error no es muy grande por lo que paramos la iteración y damos el resultado por válido.

Comprobación de  $T_2$ :

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_3) = A_2 * h_1 * (T_1 - T_2)$$

$$2.046 * 0.42034 * (140 - 64.49) = 1.8 * 25.467 * (140 - T_2')$$

$$T_2' = 138.58^\circ C$$

$$|T_1 - T_2| = |140 - 138.76| = 1.41^\circ C < 60^\circ C \rightarrow$$

La suposición es válida

Ahora bien, con los coeficientes de convección calculados, nos disponemos a calcular la temperatura  $T_3$ , con el generador instalado. Suponemos que los coeficientes de convección no variarán mucho al introducir en la sección el taco de aluminio, pero si cabe decir pues que las temperaturas a continuación calculadas serán una estimación.

Así pues, tenemos dos opciones a la hora de la instalación, o bien colocar el taco de aluminio en el exterior de la chimenea(Figura 25), o en el interior atravesando la misma(Figura 26).

### Configuración I: Taco en el exterior

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}$  ,  $k_1 = 54 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}$ ,  $k_2 = 0.04 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_3 = 50 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^\circ C$ ,  $v = 14 \text{ m/s}$ ,  $L = 49.7 \text{ m}$



- $h_1 = 25.467 \text{ W/Km}^2$
- $h_2 = 0.9724 \text{ W/Km}^2$
- $T_a = 7^\circ\text{C}$
- $L = 49.7 \text{ m}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.467} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{209} + \frac{0.008}{209} + \frac{1}{0.9724}$$

$$U = 0.5535 \text{ W/Km}^2$$

$$Q = U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.5535 * (140 - 7) = 0.9724 * (T_3 - 7)$$

$$\boxed{T_3 = 82.7^\circ\text{C}}$$

## Configuración II: Taco en el interior

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}$  ,  $k_1 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}$  ,  $k_2 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}$  ,  $k_3 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}$  ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}$  ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^\circ\text{C}$  ,  $v = 14 \text{ m/s}$  ,  $L = 49.7 \text{ m}$

- $h_1 = 25.467 \text{ W/Km}^2$
- $h_2 = 0.9724 \text{ W/Km}^2$
- $T_a = 7^\circ\text{C}$
- $L = 49.7 \text{ m}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.467} + \frac{0.0625 + 0.0295 + 0.008 + 0.015 + 0.008}{209} + \frac{1}{0.9724}$$

$$U = 0.93612 \text{ W/Km}^2$$

$$Q = U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.93612 * (140 - 7) = 0.9724 * (T_3 - 7)$$

$$\boxed{T_3 = 135.03^\circ\text{C}}$$

#### CONDICIONES CLIMÁTICAS PARA UN PERÍODO ESTIVO

Realizamos el mismo procedimiento ahora con una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ , basándonos igualmente en los datos recogidos por la Agencia Estatal de Meteorología en la estación climática de Javier, estación más próxima a Sangüesa.

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}, k_1 = 54 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}, k_2 = 0.04 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}, k_3 = 50 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}, k_4 = 0.0262 \text{ W/m K}$

- $e_5 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_4 = 50 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^\circ\text{C}$ ,  $v = 14 \text{ m/s}$ ,  $L = 49.7\text{m}$
- $T_a = 20^\circ\text{C}$

El coeficiente global de transmisión de calor será:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{e_5}{k_5} + \frac{1}{h_2} \quad (61)$$

Convección forzada:

Suponemos  $|T_1 - T_2| < 60^\circ\text{C}$ .

Tomamos las propiedades del aire para la temperatura media  $T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{140 + 20}{2} = 80^\circ\text{C}$ :

- $Pr = 0.697$
- $\nu = 20.76 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.03$

$$Re_D = \frac{v * D_2}{\nu} = \frac{14 * 1.8}{20.76 * 10^{-6}} = 1.21387 * 10^6$$

$$Nu = 0.023 * (1.21387 * 10^6)^{0.8} * 0.697^{0.3} = 1520.67$$

$$Nu = \frac{h_1 * D_2}{\kappa}$$

$$1520.67 = \frac{h_1 * 1.8}{0.03}$$

$$h_1 = 25.3445 \text{ W/Km}^2$$

Convección natural:

Suponemos temperatura  $T_3 = 27^\circ C$  y entramos en tabla para obtener las propiedades del aire a esa temperatura:

- $Pr = 0.708$
- $\nu = 16.84 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.0262$
- $\alpha = 0.2216 * 10^{-4}$

$$Gr_l = \frac{9.81 * 49.7^3 * |140 - 27| * 0.2216 * 10^{-4}}{(16.84 * 10^{-6})^2} = 1.06341 * 10^{13}$$

$$\frac{35 * 47.9}{(1.06341 * 10^{13})^{0.25}} = 0.963 \rightarrow 2.046 > 0.963 \rightarrow$$

Consideramos placa plana

$$Ra = 1.06341 * 10^{13} * 0.708 = 7.5289 * 10^{12} \rightarrow$$

Régimen turbulento

$$Nu = 0.1 * (7.5289 * 10^{12})^{1/3} = 1959.95$$

$$1959.95 = \frac{h_2 * 49.7}{0.0262}$$

$$\boxed{h_2 = 1.03321 W/Km^2}$$

Comprobación  $T_3$ :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.3445} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + 2 * \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{0.0262} + \frac{1}{1.03321}$$

$$U = 0.431255 W/Km^2$$

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T'_3 - T_a)$$

$$0.431255 * (140 - 20) = 1.03321 * (T'_3 - 20)$$

$$T'_3 = 70.08^\circ C = 343K$$

Tomamos nueva temperatura  $T'_3 = 77^\circ C = 350K$  para no tener que iterar en las tablas. Obtenemos las siguientes propiedades:

- $Pr = 0.697$
- $\nu = 20.76 * 10^{-6}$
- $\kappa = 0.03$
- $\alpha = 0.2983 * 10^{-4}$

$$Gr_l = \frac{9.81 * 49.7^3 * |140 - 77| * 0.2983 * 10^{-4}}{(20.76 * 10^{-6})^2} = 5.2514 * 10^{12}$$

$$Ra = 5.2514 * 10^{12} * 0.697 = 3.66022 * 10^{12} \rightarrow$$

Régimen turbulento

$$Nu = 0.1 * (3.66022 * 10^{12})^{1/3} = 1541.12$$

$$1541.12 = \frac{h'_2 * 49.7}{0.03}$$

$$h'_2 = 0.93025 W/Km^2$$

Volvemos a comprobar  $T_3$ :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.3445} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + 2 \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{0.0262} + \frac{1}{0.93025}$$

$$U = 0.41221 W/Km^2$$

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_a) = h'_2 * A_3 * (T'_3 - T_a)$$

$$0.41221 * (140 - 20) = 0.93025 * (T'_3 - 20)$$

$$T'_3 = 73.17^\circ C$$

La temperatura  $T_3$  supuesta era de  $77^\circ C$ . Suponemos que el error no es muy grande por lo que paramos la iteración y damos el resultado por válido.

Comprobación de  $T_2$ :

$$Q = A_3 * U * (T_1 - T_3) = A_2 * h_1 * (T_1 - T_2)$$

$$2.046 * 0.41221 * (140 - 73.17) = 1.8 * 25.3445 * (140 - T'_2)$$

$$T'_2 = 138.76^\circ C$$

$$|T_1 - T_2| = |140 - 138.76| = 1.23^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C} \rightarrow$$

La suposición es válida

Ahora bien, con los coeficientes de convección calculados, nos disponemos a calcular la temperatura  $T_3$ , con el generador instalado. Tenemos dos opciones a la hora de la instalación, o bien colocar el taco de aluminio en la pared exterior de la chimenea (Figura 25) o en la interior (Figura 26).

### Disposición I: Taco en el exterior

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}$ ,  $k_1 = 54 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}$ ,  $k_2 = 0.04 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_3 = 50 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^\circ\text{C}$ ,  $v = 14 \text{ m/s}$ ,  $L = 49.7 \text{ m}$
- $h_1 = 25.3445 \text{ W/Km}^2$
- $h_2 = 0.93025 \text{ W/Km}^2$
- $T_a = 20^\circ\text{C}$
- $L = 49.7 \text{ m}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.3445} + \frac{0.0625}{54} + \frac{0.0295}{0.04} + \frac{0.008}{50} + \frac{0.015}{209} + \frac{0.008}{209} + \frac{1}{0.93025}$$

$$U = 0.53956 W/Km^2$$

$$Q = U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.53956 * (140 - 20) = 0.903025 * (T_3 - 20)$$

$$T_3 = 87.2^\circ C$$

### Disposición II: Taco en el interior

- $D_2 = 1.8 \text{ m}$
- $D_3 = 2.046 \text{ m}$
- $e_1 = 0.0625 \text{ m}$  ,  $k_1 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_2 = 0.0295 \text{ m}$ ,  $k_2 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_3 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_3 = 209 \text{ W/m K}$
- $e_4 = 0.015 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $e_5 = 0.008 \text{ m}$ ,  $k_{Al} = 209 \text{ W/m K}$
- $T_1 = 140^\circ C$ ,  $v = 14 \text{ m/s}$ ,  $L = 49.7 \text{ m}$ 
  - $h_1 = 25.3445 \text{ W/Km}^2$
  - $h_2 = 0.93025 \text{ W/Km}^2$
  - $T_a = 20^\circ C$
  - $L = 49.7 \text{ m}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25.3445} + \frac{0.0625 + 0.0295 + 0.008 + 0.015 + 0.008}{209} + \frac{1}{0.93025}$$



$$U = 0.89684 W/Km^2$$

$$Q = U * A_3 * (T_1 - T_a) = h_2 * A_3 * (T_3 - T_a)$$

$$0.89684 * (140 - 20) = 0.903025 * (T_3 - 20)$$

$$T_3 = 139.178^\circ C$$



## B. Resultados obtenidos para la obtención de las curvas V-I, P-I de los ensayos realizados

En este anexo mostramos todos los datos que se tomaron para la obtención de las curvas V-I, P-I de cada ensayos realizado.

Como ya se explicó anteriormente, el procedimiento fue sencillo. Se fue modificando la resistencia de carga desde circuito abierto asta una resistencia de  $2\ \Omega$  y para cada toma, medíamos el valor de la tensión en bornes de la carga. Con el valor de dicha carga medido con un polímetro, obteníamos el valor de la intensidad y de la potencia.

Las tablas que se muestran a continuación corresponden a cada ensayo realizado para cada uno de los cinco disipadores a estudio y para cada condición climática analizada.

Debemos remarcar que para cada valor de la tensión para cada resistencia debíamos esperar un cierto tiempo pues al variar la resistencia de carga los flujos internos de calor se modificaban y se debía esperar hasta que estuvieran estabilizados. Así pues, el tiempo de un ensayo duró de media unas 2 horas.

Una vez obtenidos los datos que se muestran en las tablas, se representó la tensión frente a la intensidad y la potencia frente a la intensidad. Estas gráficas se pueden ver en el apartado 6.

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	1.95623	0	0
580	579.11	1.91242	3.302	6.315
360	360.75	1.8896	5.238	9.898
240	240.5	1.84893	7.688	14.214
120	120.25	1.7638	14.668	25.871
50	50.318	1.53634	30.533	46.908
15	14.782	1.00852	68.226	68.808
10	10.285	0.82763	80.470	66.599
5	4.788	0.49113	102.575	50.378
2	1.733	0.19952	115.130	22.971

**Cuadro 18:** Resultados obtenidos para el disipador KE82 en condiciones climáticas de invierno

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	2.02052	0	0
580	579.11	1.96486	3.393	6.667
360	360.75	1.93437	5.362	10.372
240	240.5	1.90331	7.914	15.063
120	120.25	1.80886	15.042	27.210
50	50.318	1.58765	31.552	50.094
15	14.782	1.0565	71.472	75.510
10	10.285	0.85662	83.288	71.346
5	4.788	0.50734	105.961	53.758
2	1.733	0.2045	118.003	24.132

**Cuadro 19:** Resultados obtenidos para el disipador ENERKIT en condiciones climáticas de invierno

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	2.4633	0	0
580	579.11	2.40115	4.146	9.956
360	360.75	2.37303	6.578	15.610
240	240.5	2.32075	9.650	22.395
120	120.25	2.2115	18.391	40.671
50	50.318	1.94925	38.739	75.511
15	14.782	1.29026	87.286	112.621
10	10.285	1.06632	103.677	110.553
5	4.788	0.63682	133.003	84.699
2	1.733	0.25632	147.905	37.911

**Cuadro 20:** Resultados obtenidos para el disipador KEA82 en condiciones climáticas de invierno

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I(mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	3.078	0	0
580	579.11	3.00694	5.192	15.613
360	360.75	2.96462	8.218	24.363
240	240.5	2.9191	12.138	35.431
120	120.25	2.77293	23.060	63.943
50	50.318	2.43791	48.450	118.117
15	14.782	1.60933	108.871	175.209
10	10.285	1.32051	128.392	169.543
5	4.788	0.77945	162.792	126.889
2	1.733	0.31535	181.968	57.384

**Cuadro 21:** Resultados obtenidos para el disipador K92 en condiciones climáticas de invierno

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	4.35220	0	0
580	579.11	4.25850	7.354	31.315
360	360.75	4.20180	11.647	48.940
240	240.5	4.12180	17.138	70.641
120	120.25	3.93070	32.688	128.486
50	50.318	3.44910	68.546	236.422
15	14.782	2.36750	160.161	379.181
10	10.285	1.88257	183.040	344.586
5	4.788	1.12955	235.913	266.475
2	1.733	0.47452	273.814	129.930

**Cuadro 22:** Resultados obtenidos para el disipador A135 en condiciones climáticas de invierno

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	1.690	0	0
580	579.11	1.651	2.851	4.707
360	360.75	1.624	4.502	7.312
240	240.5	1.599	6.647	10.627
120	120.25	1.512	12.577	19.023
50	50.318	1.322	26.282	34.758
15	14.782	0.863	58.399	50.413
10	10.285	0.704	68.482	48.235
5	4.788	0.413	86.201	35.578
2	1.733	0.166	95.967	15.960

**Cuadro 23:** Resultados obtenidos para el disipador KE82 en condiciones climáticas de verano

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	1.81515	0	0
580	579.11	1.77734	3.069	5.455
360	360.75	1.7526	4.858	8.515
240	240.5	1.7195	7.150	12.294
120	120.25	1.63346	13.584	22.189
50	50.318	1.43233	28.466	40.772
15	14.782	0.94335	63.817	60.202
10	10.285	0.76145	74.035	56.374
5	4.788	0.4422	92.356	40.840
2	1.733	0.1815	104.732	19.009

**Cuadro 24:** Resultados obtenidos para el disipador ENERKIT en condiciones climáticas de verano

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	2.17005	0	0
580	579.11	2.11466	3.652	7.722
360	360.75	2.08512	5.780	12.052
240	240.5	2.04525	8.504	17.393
120	120.25	1.94508	16.175	31.462
50	50.318	1.69659	33.717	57.205
15	14.782	1.11572	75.478	84.213
10	10.285	0.91634	89.095	81.641
5	4.788	0.5407	112.928	61.060
2	1.733	0.22023	127.080	27.987

**Cuadro 25:** Resultados obtenidos para el disipador KEA82 en condiciones climáticas de verano

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	2.5123	0	0
580	579.11	2.46269	4.253	10.473
360	360.75	2.43422	6.748	16.425
240	240.5	2.38221	9.905	23.596
120	120.25	2.26512	18.837	42.668
50	50.318	1.97489	39.248	77.511
15	14.782	1.30476	88.267	115.167
10	10.285	1.0624	103.296	109.742
5	4.788	0.631	131.788	83.158
2	1.733	0.2524	145.643	36.760

**Cuadro 26:** Resultados obtenidos para el disipador K92 en condiciones climáticas de verano

Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia real ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	I (mA)	Pot (mW)
Sin carga	Sin carga	3.8446	0	0
580	579.11	3.7769	6.522	24.633
360	360.75	3.7323	10.346	38.614
240	240.5	3.6498	15.176	55.389
120	120.25	3.4777	28.921	100.577
50	50.318	3.0823	61.256	188.811
15	14.782	2.0545	138.987	285.548
10	10.285	1.66228	161.622	268.661
5	4.788	0.99149	207.078	205.316
2	1.733	0.40947	236.278	96.749

**Cuadro 27:** Resultados obtenidos para el disipador A135 en condiciones climáticas de verano